

Schlussbericht

Projekt

Leonberg 2005+

Wasserhaushalt qualifizierter Rekultivierungsschichten

von

Peter Wattendorf, Otto Ehrmann & Werner Konold

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Institut für Landespflege

Förderkennzeichen: BWU 26004

Laufzeit: 1.09.2006 bis 31. 12.2011

Freiburg, März 2012

Inhaltsverzeichnis

1.	Vorhaben	1
1.1.	Ausgangslage	1
1.2.	Ziele.....	2
1.3.	Versuchsanlage „Leonberger Lysimeterfelder“	3
1.4.	Arbeitsprogramm	6
1.5.	Bedeutung von Langzeituntersuchungen in Leonberg.....	8
2.	Methoden.....	9
3.	Ergebnisse	10
3.1.	Entwicklung der Bodenstruktur	10
3.1.1.	Struktur des Oberbodens - Geländebeobachtungen	10
3.1.2.	Struktur des Oberbodens - mikromorphologische Untersuchungen und Messungen an Bodendünnschliffen.....	12
3.1.3.	Struktur des Unterbodens	16
3.1.4.	Fazit Bodenstruktur	19
3.2.	Trockenraumdichte des Bodens	20
3.3.	Regenwurmpopulation	21
3.3.1.	Entwicklung der Population in Leonberg.....	21
3.3.2.	Vergleich mit anderen Standorten in Baden-Württemberg.....	23
3.3.3.	Vergleich der Regenwurmpopulation von U- und K-Feld.....	24
3.3.4.	Regenwurmbauten und Regenwurmröhren.....	25
3.4.	Vegetation	27
3.4.1.	Durchwurzelung	27
3.4.2.	Gehölze.....	28
3.4.3.	Krautschicht	34
3.5.	Wasserhaushalt der Lysimeterfelder	35
4.	Literatur	45

1. Vorhaben

1.1. Ausgangslage

Seit einigen Jahren wird im Interesse einer nachhaltigen Umweltvorsorge der Wasserhaushaltsfunktion von Rekultivierungsschichten im System der Oberflächenabdichtung von Deponien vermehrte Beachtung geschenkt. Untersuchungen (z.B. BRAUNS et al. 1997) und Empfehlungen (z.B. DGGT 2000a) zur Herstellung „qualifizierter Rekultivierungsschichten“ oder „Wasserhaushaltsschichten“ legen nahe, hierbei dem Erhalt der natürlichen Bodeneigenschaften besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Aufgabe der Wasserhaushaltsschicht ist es, möglichst viel Niederschlagswasser auf natürlichem Weg durch Verdunstung abzuführen, um die Absickerung zu minimieren. Hierbei ist es von Vorteil, wenn der Boden gut durchwurzelbar ist und eine möglichst hohe Wasserspeicherkapazität besitzt. Dies ist vor allem durch möglichst geringe Bodenverdichtung beim Baubetrieb zu erreichen.

Das im Jahr 2009 und 2011 novellierte Deponierecht trägt dieser Entwicklung der Erkenntnisse unter anderem dadurch Rechnung, dass für Rekultivierungsschichten eine Untergrenze der nutzbaren Feldkapazität von 140 mm definiert wird (Anhang 1, 2.3.1). Um dieses Ziel zu erreichen, sind in der Praxis gewisse Vorgaben hinsichtlich der in der Rekultivierung zum Einsatz kommenden Bodenarten und der Bodendichte notwendig. Weiterhin werden „Wasserhaushaltsschichten“ als Sonderfall von Rekultivierungsschichten zugelassen, die unter bestimmten Voraussetzungen - vor allem in niederschlagsarmen Regionen - Dichtungselemente ersetzen können. Eine Wasserhaushaltsschicht hat nach aktuellem Recht folgende besondere Voraussetzungen zu erfüllen (Anhang 1, 2.3.1.1):

1. Die Mindestdicke muss 1,50 m betragen.
2. Die Wasserhaushaltsschicht soll eine nutzbare Feldkapazität von wenigstens 220 mm, bezogen auf die Gesamtdicke der Wasserhaushaltsschicht, aufweisen.
3. Die Durchsickerung darf höchstens 10 Prozent vom langjährigen Mittel des Niederschlags (in der Regel 30 Jahre), höchstens 60 mm pro Jahr, spätestens fünf Jahre nach Herstellung betragen.

Bislang wurden in der Deponiebaupraxis nur wenige qualifizierte Rekultivierungsschichten realisiert (WATTENDORF 2005). Dies mag auch darin begründet sein, dass Vorteile, die überwiegend den Wasserhaushalt und die Vegetationsentwicklung betreffen, allgemein noch nicht gebührend wahrgenommen werden. Um praxistaugliche, Boden schonende Einbauverfahren zu erproben sowie mögliche Vorteile unverdichteter Rekultivierungsschichten für die Standortentwicklung (Boden, Vegetation) und den Wasserhaushalt zu untersuchen und vor allem zu quantifizieren, wurde in vorangegangenen interdisziplinären Forschungsvorhaben (Projekte BWS 99003 und BWD 21010, siehe 1.2) auf dem Gelände der Kreismüldeponie Leonberg eine umfangreiche Versuchsanlage installiert (siehe 1.3).

Sicher auch unter dem Einfluss der Versuchsergebnisse aus Leonberg ist seit kurzem ein Umdenken zu erkennen. So wurde beispielsweise eine große Deponie im Landkreis Böblingen in den letzten Jahren rekultiviert und das Bodenmaterial, soweit es die Vorgaben zur Standsicherheit zuließen, unter Berücksichtigung der Leonberger Erkenntnisse eingebaut (EHRMANN & WATTENDORF 2010).

1.2. Ziele

Die Ziele der vorangegangenen Forschungsvorhaben BWSO 99003 und BWD 21010 in Leonberg waren, qualifizierte Rekultivierungsschichten im praxisnahen Versuchsbetrieb bodenschonend herzustellen, den Wasserhaushalt unterschiedlich hergestellter Rekultivierungsschichten zu untersuchen und Erkenntnisse zu gewinnen, wie das Einbauverfahren und die weitere Standortentwicklung (Boden, Vegetation) den Wasserhaushalt und damit die Funktion der Wasserhaushaltsschicht innerhalb des Systems „Oberflächenabdichtung einer Deponie“ beeinflussen.

Hauptziel des Vorhabens BWU 26004 war die Fortführung der Forschungsarbeiten zum Wasserhaushalt und zur Boden- und Vegetationsentwicklung qualifizierter Rekultivierungsschichten im unbedingt notwendigen Umfang, um lückenlose Datenreihen vom Initialstadium der Boden- und Vegetationsentwicklung bis zum ausgebildeten Waldbestand zu gewinnen.

Weiterhin sollte der Bestand der Anlage für den Langzeitbetrieb gesichert werden. Nur durch regelmäßige Kontrollen und Wartung ist es möglich, Funktionsstörungen rechtzeitig zu erkennen und zu beheben sowie eventuelle Reparaturen durchzuführen, um den Betrieb der Lysimeteranlage auf lange Sicht zu gewährleisten.

1.3. Versuchsanlage „Leonberger Lysimeterfelder“

Im Zuge zweier aufeinander aufbauender Forschungsvorhaben wurde auf dem Gelände der Kreismülldeponie Leonberg eine aufwändige Versuchsanlage installiert. Die Einrichtung der Versuchsfelder sowie erste Untersuchungen in der Zeit von Dezember 2000 bis April 2004 wurden vom Land Baden-Württemberg (Projekte BWSD 99003 und BWD 21010) und dem Landkreis Böblingen gefördert.



Bild 1: Die Versuchsanlage auf der Kreismülldeponie Leonberg

Die Versuchsanlage der Leonberger Lysimeterfelder besteht im Wesentlichen aus zwei Großlysimetern (Bild 1, Tabelle 1-1) sowie einem Testfeld für Buschlagenbau. Der Aufbau der Lysimeterfelder entspricht einer Regel-Oberflächenabdichtung nach TA SIEDLUNGSABFALL (1993): Auf dem als mineralische Abdichtung ausgeführten Auflager liegt eine verschweißte 2,5 mm starke Kunststoffdichtungsbahn. Sie wurde zur Begrenzung der Lysimeterfelder über Randdämme hochgezogen, so dass zwei nebeneinander liegende geschlossene Wannen mit Sammeleinrichtungen für das Sickerwasser entstanden. In diese wurden im Herbst 2000 eine 30 cm starke mineralische Entwässerungsschicht und die beiden Versuchsvarianten der Rekultivierungsschicht eingebaut:

- „unverdichtet eingebaute Rekultivierungsschicht“ **Feld U**
Hier wurde der Boden mit einer leichten Raupe Hang abwärts in der Gesamtmächtigkeit der Rekultivierungsschicht ohne Zwischenverdichtung eingeschoben.
- „konventionell verdichtete Rekultivierungsschicht“ **Feld K**
Im K-Feld wurde der Boden mit der gleichen Raupe in vier Lagen eingeschoben, die drei unteren Lagen wurden mit einer Vibrationswalze auf circa $0,95 \rho_{Pr}$ verdichtet.

In beide Lysimeterfelder wurde das gleiche Bodenmaterial (Lösslehm, toniger Schluff) eingebaut. Die Rekultivierungsschichten unterscheiden sich nur durch das Einbauverfahren und die daraus resultierenden Bodeneigenschaften (Tabelle 1). Die beiden Lysimeterfelder

sind durch circa 2 m breite und mit HDPE-Folie belegte Rinnen seitlich begrenzt (siehe Bild 1 und Bild 2), um einen lateralen Eintritt von Niederschlagswasser zu vermeiden.

Nach Abschluss der Bodenarbeiten wurden die Testfelder eingesät und überwiegend mit Aspen (*Populus tremula*) bepflanzt. Zur Ergänzung ausgefallener Aspen wurden in den Folgejahren weitere Baumarten eingebracht, vor allem Vogelkirsche (*Prunus avium*) und Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*).

Tabelle 1-1: Eigenschaften der Leonberger Lysimeterfelder

Lysimeterfeld	K	U	
Fläche	360	360	[m ²]
Exposition	Ost-Süd-Ost		
Hangneigung	< 1:2,7		
Mächtigkeit Rekultivierungsschicht*	circa 2,1**		[m]
Bodenart	Ut2 / Ut3		
Steingehalt	< 1		[Vol-%]
Feldkapazität (Mittel)***	34 – 35,5	35,3 – 35,9	[Vol-%]
nutzbare Feldkapazität	ca. 22	ca. 23	[Vol-%]
* Es wurde in beiden Feldern kein humoser Oberboden (Mutterboden) aufgetragen.			
** Das U-Feld wurde 20 cm überhöht eingebaut. Durch Setzungen haben sich die Felder angeglichen.			
*** in Situ Messung			

Die Lysimeterfelder sind mit einer Reihe von Messeinrichtungen ausgerüstet: Die Abflüsse aus der Rekultivierungsschicht der Lysimeterfelder werden in einer Messstation unterhalb der Versuchsanlage gesammelt und mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten registriert. Der Bodenwassergehalt der Rekultivierungsschicht kann an vier Messstellen pro Lysimeterfeld mit TDR-Sonden in 25, 50, 85 und 135 cm Tiefe gemessen werden. Zusätzlich besteht im K-Feld ein Messprofil mit 10 Sonden, die gezielt in Schichten unterschiedlichen Verdichtungsgrades eingebaut wurden. Weitere Angaben zur Versuchsanlage finden sich in WATTENDORF et al. (2005).

In unmittelbarer Nähe der Lysimeterfelder wird seit März 2005 eine Wetterstation zur Messung von Niederschlag, Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit betrieben.

Reparaturarbeiten an den Testfeldern

Zusätzlich zum laufenden Arbeitsprogramm mussten in der Projektlaufzeit umfangreiche Reparaturarbeiten an der Lysimeteranlage ausgeführt werden. Die Abdeckfolie der Trennstreifen zwischen den Lysimeterfeldern und am Rand der Testfelder war trotz Nachbesserungen im Jahr 2003 nicht mehr einwandfrei und musste vollständig erneuert werden.

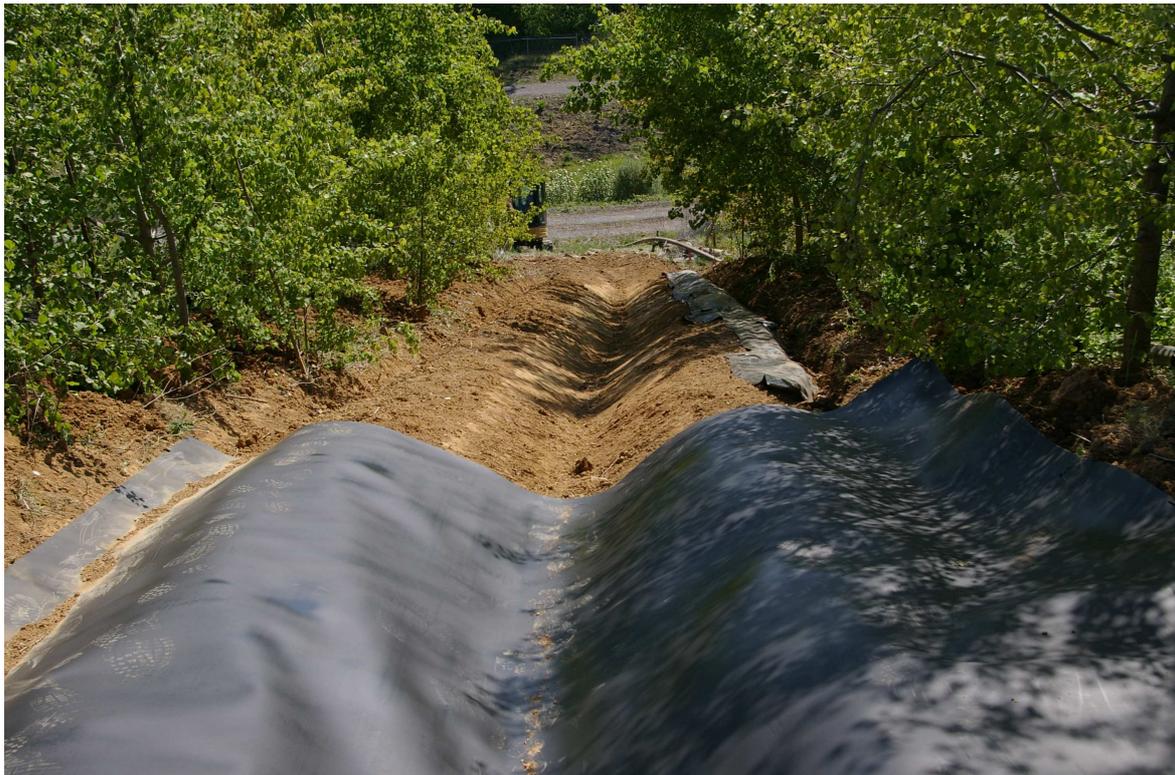


Bild 2: Reparaturarbeiten im Mai 2008: neu profiliertes und mit HDPE-Folie belegter Trennstreifen

Der Abfallwirtschaftsbetrieb des Landkreises Böblingen konnte die Reparatur im Rahmen weiterer Baumaßnahmen auf der Kreismülldeponie ausführen lassen und war bereit, die Kosten der Maßnahme zu tragen. So konnten im Mai 2008 die Trennstreifen mit dem Bagger neu profiliert und anschließend die Folienabdeckungen erneuert werden (siehe Bild 2). Die Reparaturarbeiten wurden von den Projektmitarbeitern koordiniert und durchgehend überwacht. So war sichergestellt, dass die Besonderheiten der Versuchsanlage während der Baumaßnahme berücksichtigt und Schäden vermieden werden.

1.4. Arbeitsprogramm

Das Projekt BWU 26004 führte ein im Vergleich zu den vorangegangenen Vorhaben reduziertes Untersuchungsprogramm fort. Es waren vor allem die nachfolgend beschriebenen wissenschaftliche Untersuchungen zur Fortschreibung der langjährigen laufenden Datenreihen sowie zusätzlich Wartungs- und bei Bedarf Reparaturarbeiten an der Versuchsanlage vorgesehen. Hierfür wurde das Vorhaben mit einer jährlichen Zuwendung in Höhe von circa 25.000 € gefördert.

Kontinuierliche Messung der Absickerungsraten

Die Absickerung (Dränabfluss aus der Rekultivierungsschicht) geht als standortabhängige Messgröße in die Wasserhaushaltsbilanz ein und ist die wichtigste Vergleichsgröße zur Beurteilung der Wirksamkeit einer Rekultivierungsschicht als „Wasserhaushaltsschicht“. Das Erfassen der Absickerung beinhaltet das Auslesen der Datenlogger, die Prüfung auf Vollständigkeit und Fehler sowie die Auswertung.

Dokumentation des lokalen Wettergeschehens

Wetterdaten, vor allem Niederschlagswerte sind als Faktoren der Wasserhaushaltsbilanz und für das Verständnis des Wasserhaushalts der Rekultivierungsschichten erforderlich. In circa drei km Entfernung von den Versuchsfeldern besteht eine DWD-Station, die Niederschlagswerte liefert. Da Niederschläge mit einer hohen räumlichen Varianz auftreten, ist es darüber hinaus erforderlich, die lokalen Niederschlagsmengen zu erfassen. Aus Eigenmitteln des Betreibers wurde deshalb im Jahr 2005 auf den Testfeldern eine Wetterstation eingerichtet, die es erlaubt, den Niederschlag vor Ort und mit höherer zeitlicher Auflösung zu messen.

Messungen der Bodenwassergehalte und der Stauwasserstände

Bodenwassergehalte in unterschiedlichen Tiefenstufen sind zur Interpretation des Verhaltens der Lysimeterfelder sowie als Vergleichsdaten zur Validierung der Wasserhaushaltsmodelle notwendig. Stauwasser in der Rekultivierungsschicht ist ungünstig, weil es die Bodenbelüftung hemmt und die Standsicherheit des Bodens an Böschungen nachteilig beeinflussen kann.

Dokumentation der Bodenstruktur

Durch die Umlagerung wurde die Struktur des Bodens der Rekultivierungsschichten weitgehend zerstört. Im Lauf der Zeit bildet sich eine neue Struktur aus. Dies geschieht abiotisch durch Setzungen, Frost sowie Quellen und Schrumpfen des Bodens, biotisch durch Wurzeln und Bodentiere, vor allem Regenwürmer. Diese biotische Bodenstrukturbildung reicht viel tiefer als die abiotische, vor allem aber sind die hierbei entstehenden Gefügestrukturen stabiler.

Da die Bedingungen für die Bodenorganismen in den Testfeldern U und K verschieden sind (siehe WATTENDORF et al. 2005), ist auch eine unterschiedliche Bodenstrukturbildung zu erwarten. Sie soll durch die Zählung der Röhren und Losungen von Regenwürmern im Gelände sowie durch die Untersuchung der Feinstruktur (Wurzelröhren, Regenwurmlösungen, sonstige Aggregate) im Dünnschliff dokumentiert werden.

Dokumentation der Entwicklung der Regenwurmpopulation

Regenwürmer beeinflussen die Entwicklung der Bodenstruktur maßgeblich, deshalb muss die unterschiedliche Besiedlung und Populationsentwicklung in den Testfeldern dokumentiert werden. Bisher gibt es sehr wenig Literatur zur Entwicklung dieser für Nährstoffumsatz und Bodenstruktur so wichtigen Organismen auf rekultivierten Deponien. Durch die Bodenumlagerung und den Einbau der Rekultivierungssubstrate wurde die im Boden enthaltene Regenwurmpopulation so stark geschädigt, dass im Frühjahr 2001, ein halbes Jahr nach Erstellung der Anlage, keine Regenwürmer mehr zu finden waren. Um die Besiedlung der Lysimeterfelder zu beschleunigen, wurden gezielt Regenwürmer in die Flächen eingebracht. Dies war erfolgreich (siehe EHRMANN 2005). Die Populationsentwicklung ist jedoch noch nicht abgeschlossen und wird daher weiter untersucht.

Dokumentation der Vegetationsentwicklung

Die Vegetation wirkt durch ihren Wasserverbrauch direkt auf den Wasserhaushalt der Rekultivierungsschichten. Morphologische und strukturelle Merkmale (z. B. Blattfläche), Art des Bewuchses, Vitalität oder Durchwurzelungsintensität und -tiefe beeinflussen die Verdunstungsleistung. Andererseits haben die Versuche gezeigt, dass die Vitalität und die Entwicklung der Gehölze auch unterschiedliche Standorteigenschaften widerspiegeln (siehe 3.4). Deshalb werden der Zustand und die Entwicklung des krautigen Bewuchses (oberirdische Biomasse, Deckung, Artbestand) und der Gehölze (Vitalität, Zuwachsraten) erfasst.

Wartung der Lysimeteranlage

Die regelmäßigen Untersuchungstermine ermöglichen es, Funktionsstörungen der Messeinrichtungen zu erkennen und zu beheben. Bei Bedarf werden Reparaturen durchgeführt, um den Betrieb der Lysimeteranlage und der Wetterstation auf lange Sicht zu gewährleisten.

1.5. Bedeutung von Langzeituntersuchungen in Leonberg

Aus folgenden Gründen ist Langzeitforschung an der Leonberger Lysimeteranlage sinnvoll:

- Der Wasserhaushalt der Rekultivierungsschichten ist sowohl von den klimatischen Rahmenbedingungen als auch von den sehr variablen Faktoren Witterung und aktuelles Wettergeschehen abhängig. Wasserhaushaltsbetrachtungen müssen die gesamte Bandbreite dieser Variabilität erfassen, um wertvolle und auf andere Standorte übertragbare Ergebnisse zu liefern. Dies gilt auch im Hinblick auf die sich möglicherweise verändernden klimatischen Bedingungen. Hierzu sind langjährige kontinuierliche Messreihen erforderlich.
- Zum Erstellen von Wasserhaushaltsbilanzen der Lysimeterfelder sind möglichst lückenlose Datenreihen notwendig. Auch zur Validierung von Wasserhaushaltsmodellen sind langjährige Vergleichsdaten mit möglichst unterschiedlichen Witterungsbedingungen notwendig.
- Die interessanteste Messperiode im Hinblick auf die Bewertung des Wirkungsgrades der Wasserhaushaltsschichten beginnt nach der Etablierung eines weitgehend geschlossenen Baumbestandes. Dies wird voraussichtlich bei einem Bestandesalter von circa zehn Jahren der Fall sein. Dann zeigt sich, wie groß die Unterschiede zwischen den Lysimeterfeldern mit verdichteter und unverdichteter Rekultivierungsschicht langfristig sein werden.
- Es werden grundlegende bodengenetische Erkenntnisse über die Entwicklung umgelagerter Substrate, insbesondere hinsichtlich der Bodenstruktur, gewonnen.
- Die Entwicklung des Bodenlebens und der Vegetation beeinflusst die Standortbedingungen und somit auch den Wasserhaushalt der Rekultivierungsschichten. Die Untersuchung dieser Entwicklung auf den neu geschaffenen Standorten liefert weitere Grundlagen zum Verständnis des Wasserhaushalts, die auch für zukünftige Rekultivierungen genutzt werden können. Außerdem bietet sich in Leonberg die seltene Gelegenheit, diese Prozesse vom „Nullpunkt“ der Sukzession an im Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt zu betrachten.

2. Methoden

Es wird im Folgenden nur auf Methoden eingegangen, die in den Berichten zu den Vorgängerprojekten (siehe vor allem WATTENDORF et al. 2005) noch nicht beschrieben sind.

Probenahme der Dünnschliffe zur Beurteilung der Bodenstruktur

Um die Bodenstruktur bei der Probenahme nicht zu verändern, wurden die Proben mit an der Vorder- und Rückseite offenen Blechrahmen¹ entnommen. Dabei wurde der Rahmen durch behutsames Vorschneiden an den Seiten über die Bodenprobe geschoben.

Im Labor wurde der Boden durch Acetonaustausch entwässert und anschließend in Kunstharz fixiert. Nach dem Aushärten des Kunstharzes wurden die Proben in Scheiben geschnitten. Die ausgewählte Scheibe wurde angeschliffen, auf eine Glasplatte aufgeklebt und bis zu einer Dicke von ca. 30 µm abgeschliffen. Nach dem Polieren wurde die Oberfläche mit einem Deckglas abgedeckt. Damit ist der so genannte Bodendünnschliff fertiggestellt².

Flächendeckende Messung der Bestandeshöhe³

Bei den Messungen zur Bestandeshöhe wurden die maximale Höhe und der maximale Kronenradius jedes nicht vollständig von benachbarten Bäumen überschirmten Baumes gemessen und aufgenommen. Bei Bäumen über 2 m Höhe wurde mit einem Vertex-III Messgerät gemessen, bei Bäumen <2 m mit einem Metermaß. Parallel dazu wurde die Höhe der Pflanzen <1 m erfasst (Gräser, Kräuter, niedrige Sträucher und Jungwuchs der Bäume).

Die gewonnenen Daten wurden in ein Geländemodell der Bestandeshöhe mit einer Auflösung von 0,5 x 0,5 m umgewandelt. Hierzu wurde in einem horizontalen Radius von 0,75 m um die Kronenspitze die Höhe des Baumes im Geländemodell als die maximale Baumhöhe angenommen. Zwischen 0,75 m und 1,25 m Entfernung von der Kronenspitze wird die Baumhöhe im Modell als 80 % der maximalen Höhe angenommen, zwischen 1,25 m und 1,75 m als 75% der maximalen Höhe und ab 1,75 m Entfernung von der Kronenspitze als 50% der maximalen Baumhöhe. Ein Baum wird im Modell also vereinfacht durch vier aufeinanderliegende Zylinder dargestellt. Im Modell wird die Kronenobergrenze bis zum dem maximalen Kronenradius eines Baumes berücksichtigt, wenn nicht bereits näher am Stamm eine Schnittfläche mit der höher liegenden Krone eines Nachbarbaumes entsteht, der erste also vom zweiten Baum überschirmt wird. Liegt die gemessene Oberhöhe eines Baumes niedriger, als die potentielle Krone eines benachbarten Baumes, wird die horizontale Oberfläche dieses Baumes an der Kronenobergrenze als Kreis mit $r = 0,75$ m angenommen. Überschneiden sich bei zwei benachbarten Individuen diese minimalen Kronenflächen an der Bestandesobergrenze, so überwiegt das Individuum, dessen minimale Kronenfläche an der Bestandesobergrenze höher liegt. Liegt an einem Punkt der Fläche keine Überschirmung durch Bäume vor, so entspricht dort die maximale Bestandeshöhe der Höhe des Unterwuchses.

¹ so genannte Kubienkästen mit den Abmessungen H: 8 cm, B: 6 cm, T: 4 cm

² Eine ausführliche Methodenbeschreibung ist bei KREBS (1995) zu finden.

³ Diese Messung wurde von J. Sohrnt im Rahmen einer Abschlussarbeit ausgeführt (SOHRT 2010)

3. Ergebnisse

3.1. Entwicklung der Bodenstruktur

In die Leonberger Lysimeterfelder wurde Löss-Unterbodenmaterial eingebaut. Lössböden gehören zu den fruchtbarsten Böden und sind auch im mittleren Neckarraum das beste verfügbare Material für Rekultivierungen. Die Bodenumlagerung beeinflusst das Bodengefüge aber grundlegend:

- a) Das natürlich gewachsene Bodengefüge wird weitgehend zerstört. Lössböden weisen ein ausgeprägtes Sekundärgefüge auf, zu dem in der Regel auch mehrere Hundert große Regenwurmröhren je m² im Unterboden gehören. Diese großen Poren sind oft über große Strecken im Boden fortlaufend und stellen so wichtige Wege für Wasser, Luft, Wurzeln und Tiere dar. Durch die Bodenumlagerung werden diese Poren teilweise zerstört und vor allem wird ihre Kontinuität unterbrochen.
- b) Ungeschützter Löss ist sehr erosionsempfindlich. Durch eine Pflanzendecke, die Lebendverbauung mit organischer Substanz und eine gute Drainage (Regenwurmröhren) kann die Erosionsempfindlichkeit stark vermindert werden.

Im folgenden Kapitel wird dargestellt, wie die Entwicklung der Struktur des in Leonberg eingebauten Unterbodenmaterials bisher verlief.

3.1.1. Struktur des Oberbodens - Geländebeobachtungen

Beim Einbau der Rekultivierungsschichten wurde aus verschiedenen Gründen (Kosten, Gefahr der Verdichtung, Gefahr der Konzentration der Wurzeln auf den Oberboden und die Grenzschicht) auf den Auftrag von humosem Oberboden verzichtet und nur eine circa 2 cm starke Kompostschicht auf der Bodenoberfläche ausgestreut. So konnte untersucht werden, ob und wie schnell sich ein humoser, krümeliger Oberboden aus diesem Ausgangsmaterial entwickeln kann. Im Frühjahr 2007 und 2011 wurden dazu aus dem weiter entwickelten U-Feld Proben für mikromorphologische Untersuchungen entnommen und mit älteren Proben verglichen.

Im Frühjahr 2007 ist von dem im Frühjahr 2001 ausgebrachten Kompost nichts mehr zu erkennen. Der Kompost und die vor Ort gebildete organischen Substanz, überwiegend Blätter, wurden vor allem durch Regenwürmer eingemischt (siehe auch Bild 33 und 4) und mit Mineralboden vermengt als Losung wieder ausgeschieden. Dieses Gemisch hat eine dunkelbraune Farbe. So sind ungefähr die oberen 8 - 10 cm des Bodens an den humusreichen Stellen weitgehend und an den humusärmeren Stellen teilweise durch Regenwürmer überprägt worden.

Im Frühjahr 2011 hat sich dieser Eindruck nicht wesentlich verändert (Bilder 5 und 6). Der Anteil der Regenwurmlösungen ist etwas gestiegen, aber sie sind etwas weniger dunkel. Das humusreiche Material wurde weiter mit dem Mineralboden vermischt und durch Verdünnung in Folge der Vermischung und durch Abbau wurde der Humusgehalt verringert.

Innerhalb von circa 10 Jahren hat sich so ein 5 - 10 cm mächtiger humoser Oberboden ausgebildet, der eine günstige Krümelstruktur aufweist. Der Oberboden ist mit dem Unterboden eng verzahnt und die für Mutterbodenauftrag typische ungünstige scharfe horizontale Grenze fehlt in Leonberg. Insgesamt hat sich die Oberbodenstruktur wesentlich verbessert.

Frühjahr 2007



Bild 3: Oberboden - humusreiche Stelle



Bild 4: humusarme Stelle

Frühjahr 2011



Bild 5: Oberboden - humusreiche Stelle



Bild 6: humusarme Stelle

Bilder 3 – 6: Oberboden im Frühjahr 2007 und 2011. Die Bildhöhe beträgt jeweils 16 cm.

3.1.2. Struktur des Oberbodens - mikromorphologische Untersuchungen und Messungen an Bodendünnschliffen

Mit mikromorphologischen Methoden kann der Boden bei einer wesentlich stärkeren Vergrößerung als im Gelände betrachtet werden. Außerdem können echte Schnitte angefertigt werden, während im Geländeprofil der Boden eher an Aggregatoberflächen bricht. Durch unterschiedliche Beleuchtungstechniken wie Auflicht, Durchlicht und Polarisation können zusätzliche Information erhalten werden.

3.1.2.1. Flächenanteile von Regenwurmlosungen von 2001 bis 2011

Im Jahr 2001, kurz nach Anlage der Leonberger Lysimeterfelder, wurden wegen des Fehlens der Regenwurmpopulation im Unterboden keine Regenwurmlosungen gefunden. 2003, ein Jahr nach dem Aussetzen der Regenwürmer, lag der Flächenanteil der Regenwurmlosungen in den oberen 8 cm des Bodens immerhin schon bei knapp 10 %. Im Zuge der starken Vermehrung der Regenwürmer stieg der Anteil bis zum Frühjahr 2007 auf circa 2/3 der Fläche (siehe Abbildung 3-1 und Bilder 7-9. Seitdem ist dieser Anteil trotz einer deutlichen Zunahme der Regenwurmpopulation (Abbildung 3-5) aber kaum noch angestiegen (Bild 10). Dies verwundert auf den ersten Blick sehr. Die mikromorphologischen Untersuchungen zeigen aber, dass die Regenwurmlosungen sich verändert haben.

3.1.2.2. Partikel-Größe der organischen Substanz

Der auf den Versuchsfeldern ausgebrachte Kompost hat sich im Zeitraum von 2001 bis 2011 deutlich verändert (Abbildung 3-2, Bild 7 bis 10). Die drei größten Partikel der organischen Substanz eines Dünnschliffausschnittes hatten 2001 eine mittlere Größe von 1174 μm . Im Jahr 2003, nachdem der meiste Kompost inzwischen von den Regenwürmern gefressen worden war, lag dieser Wert bei 256 μm . Vier Jahre später (2007) hatte sich dieser Wert auf 130 μm halbiert und nach weiteren vier Jahren (2011) nochmals halbiert (62 μm). Aufgrund der Partikelform sind abiotische Faktoren wie Frost oder Quellen und Schrumpfen als Ursache dieser Verkleinerung der Partikelgröße auszuschließen. Seit 2007 kommt organische Substanz praktisch nur noch innerhalb von Regenwurmlosungen vor, die Verkleinerung ist daher eindeutig eine Folge wiederholten Fraßes durch Regenwürmer. Die Regenwürmer haben im Zeitraum von 2007 bis 2011 praktisch kaum mehr zusätzlichen Mineralboden, sondern vor allem wiederholt die humusreichen Regenwurmlosungen gefressen. Diese sind als Nährstoffquelle wesentlich interessanter als der humusarme Mineralboden

Ein Teil der organischen Substanz wurde beim Fraß durch Regenwürmer mineralisiert, ein anderer Teil deutlich verkleinert und ein großer Teil so weit verkleinert, dass unter dem Lichtmikroskop keine Partikel mehr erkennbar sind. Diese organische Substanz kann nur noch als Teil der dunkel gefärbten organomineralischen Feinsubstanz wahrgenommen werden (Bild 12).

Abbildung 3-1: Anteil von Regenwurm-
losungen an der Dünnschlifffläche
(Oberboden, 0-8 cm) ; Auszählung
unter dem Mikroskop

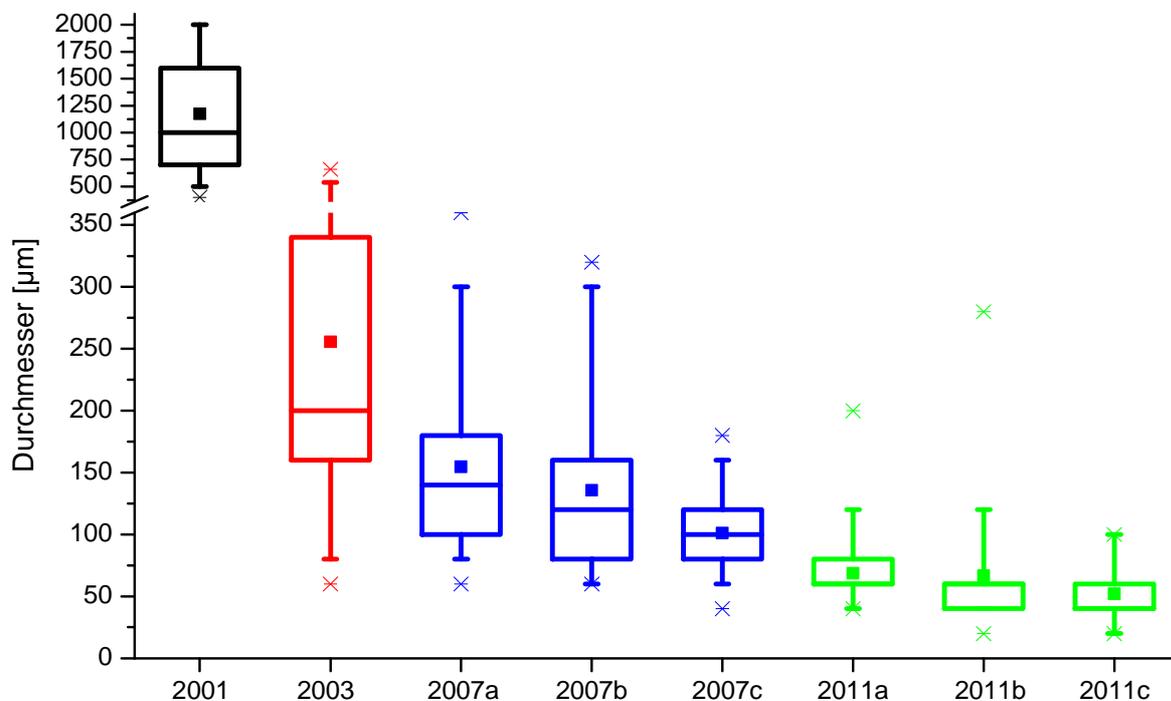
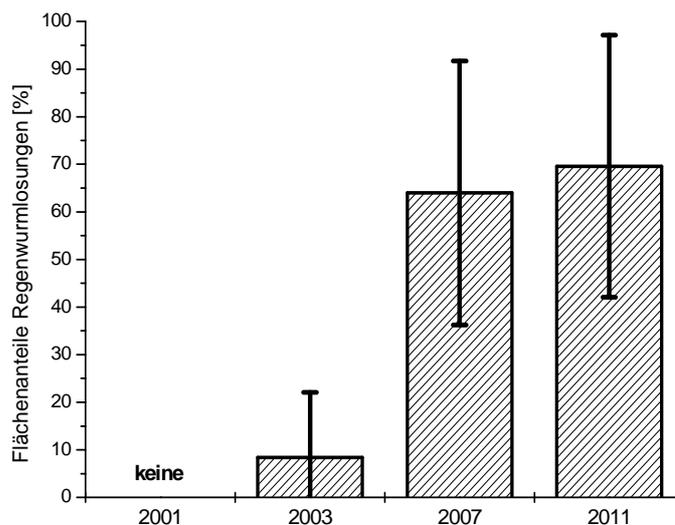


Abbildung 3-2: Partikel-Durchmesser der organischen Substanz in unterschiedlichen Zeitabständen nach dem Bodeneinbau. Vermessen wurden jeweils die drei größten Teile organischer Substanz in einem Ausschnitt von 2x2 mm am Mikroskop. In den Jahren 2001 und 2003 wurde jeweils ein Dünnschliff vermessen, in den Jahren 2007 und 2011 jeweils 3 Dünnschliffe. Pro Dünnschliff wurden im Mittel 93 Objekte vermessen. Zonen die nur Unterboden enthielten wurden bei der Messung nicht berücksichtigt.

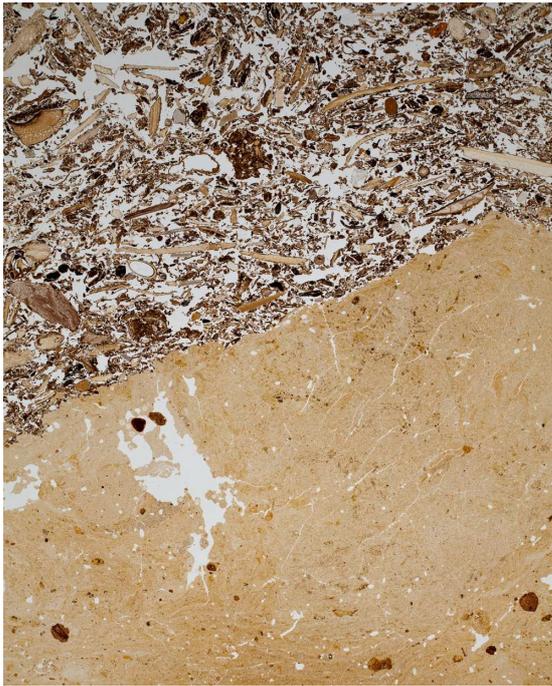


Bild 7: Frühjahr 2001 (0,5 Jahre nach Bau): Kompost und Boden sind scharf getrennt. Im Boden sind keine Spuren von Bodentieren zu erkennen. Die dunklen Objekte im Mineralboden sind Eisenkonkretionen. Vor allem unten rechts ist alte Tonverlagerung (gelbbraune Schlieren) zu sehen.

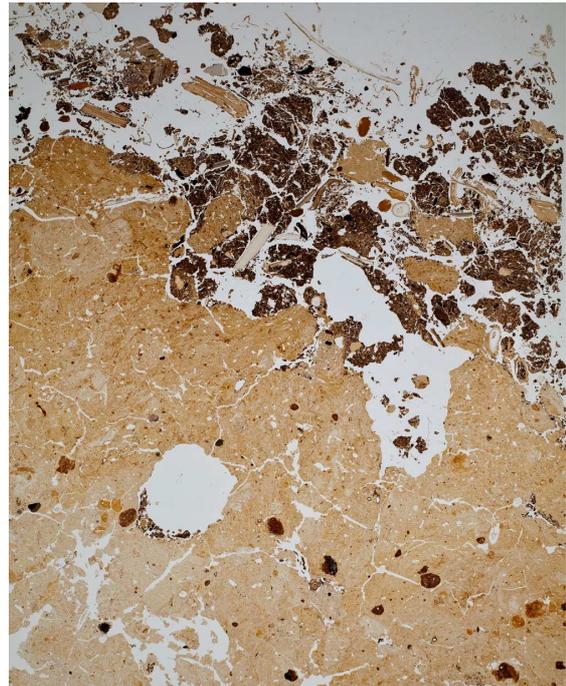


Bild 8: Frühjahr 2003 (nach 2,5 Jahren): Nur noch wenig Kompost ist auf der Bodenoberfläche zu sehen, der meiste Kompost ist in den \pm runden Regenwurmlösungen. Der Mineralboden ist etwas hohlraumreicher, es dominiert aber noch die ursprüngliche Struktur. In der Bildmitte ist eine Regenwurmröhre zu sehen.



Bild 9: Frühjahr 2007 (nach 6,5 Jahren): Der Kompost ist verschwunden; er wurde entweder mineralisiert oder in den Boden eingearbeitet. Der Oberboden ist - bis auf wenige Stellen - viel dunkler (=humusreicher) und weist ein Gefüge vorwiegend aus Regenwurmlösungen (\pm verrundete Aggregate), Regenwurmröhren und zahlreichen kleineren Hohlräumen auf.

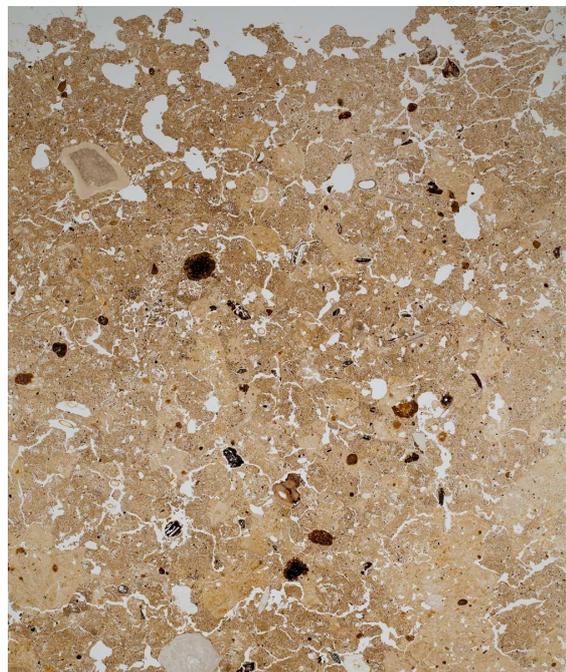


Bild 10: Frühjahr 2011 (nach 10,5 Jahren). Der Oberboden hat sich im Vergleich zu 2007 nur noch wenig verändert. Es dominieren die \pm runden Regenwurmlösungen. Genauere Messungen (Abbildung 3-2) zeigen aber dass der Boden mehrfach von Regenwürmern gefressen wurde.

Bilder 7 – 10: Entwicklung des Oberbodens im U-Feld von 2001 bis 2011 (Zeitreihe anhand von vier Bodendünnschliffen; Höhe jeweils 70 mm).

3.1.2.3. Auflösung von Tonbelägen durch Regenwürmer und Neubildung von Ton-Humus-Komplexen

Der in Leonberg eingebaute Löss-Unterboden ist relativ tonreich (Bild 11). Messungen an Dünnschliffen ergaben einen Flächenanteil von 2,4 % Tonbelägen an der gesamten Dünnschlifffläche. Für die Ausweisung eines Bt-Horizontes genügt nach AG BODEN (2005) schon ein Flächenanteil von 1,0 %.

Es fällt auf, dass die Regenwurmlosungen, die eine Mischung aus organischer Substanz und überwiegend Mineralboden darstellen, fast keine Tonbeläge mehr enthalten. Die Regenwürmer haben die Tonbeläge im Regenwurmdarm weitestgehend aufgelöst (Abbildung 3-3, Bild 11). Da die Regenwurmlosungen gleichzeitig einen erheblichen Anteil sehr kleiner Teilchen organischer Substanz aufweisen, kann diese mit dem Ton zu einer organomineralischen Feinsubstanz vermischt werden (Bild 12). Aufgrund dieser intensiven Vermischung können dann relativ stabile Ton-Humus-Komplexe entstehen, was die Bodenstruktur verbessert.

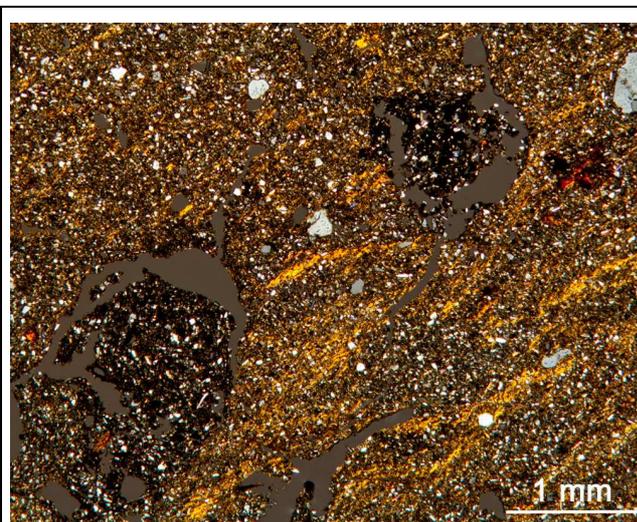


Bild 11, Frühjahr 2011: Der eingebaute Unterboden enthält zahlreiche Tonbeläge (gelbe Streifen). Die Regenwurmlosungen (dunkel, gerundet) enthalten keine Tonbeläge mehr, diese wurden aufgelöst.

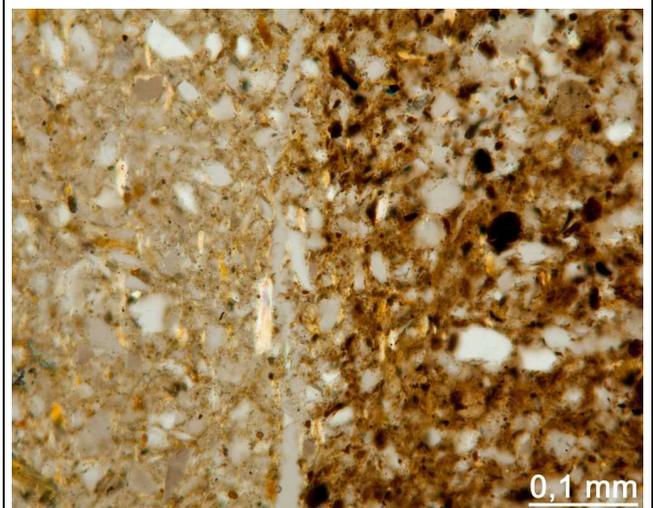


Bild 12, Frühjahr 2011: Vergleich eingebauter Unterboden (linke Bildhälfte mit einer Regenwurmlosung (rechte Seite). In der Regenwurmlosung gibt es viel braune organische Substanz in verschiedenen Größen. Sie wurde intensiv mit dem Mineralboden vermischt. Kleinere mineralische und organische Teile bilden eine unter dem Lichtmikroskop nicht mehr aufzulösende organomineralische Feinsubstanz. In dieser können stabile Ton-Humus-Komplexe entstehen.

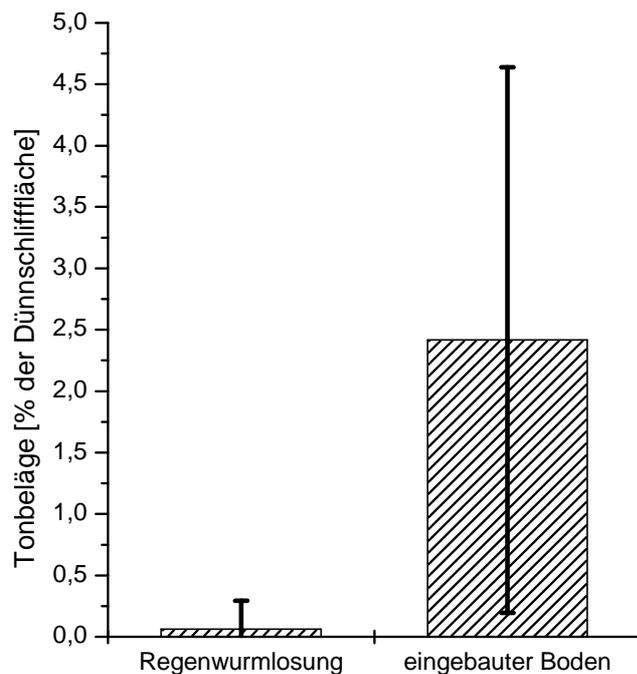


Abbildung 3-3: Flächenanteile von Tonbelägen in Regenwurmlosungen und im eingebauten Boden. Die Regenwurmlosungen setzen sich aus dem eingebauten Mineralboden und organischer Substanz zusammen. Der Anteil des Mineralbodens überwiegt.

3.1.3. Struktur des Unterbodens

Der zur Herstellung der Rekultivierungsschichten in Leonberg verwendete Lösslehm besitzt im Unterboden im ungestörten Zustand normalerweise ein ausgeprägtes biogenes Bodengefüge. Durch die bei der Bodenumlagerung unvermeidliche Zerstörung der Kontinuität des Porensystems sind Transportprozesse wie die Infiltration von Niederschlägen und die Belüftung des Unterbodens stark beeinträchtigt.

Die Untersuchungen des Oberbodens zeigten, dass sich bis circa 5 – 10 cm Tiefe vor allem durch die Tätigkeit von Regenwürmern ein krümeliges Bodengefüge entwickelt hat (s. o.). Im Folgenden soll die Entwicklung des Unterbodens betrachtet werden.

Im Frühjahr 2001, fünf Monate nach dem Bau der Rekultivierungsschichten, wurden in jedem Testfeld in einem Bodenprofil in unterschiedlichen Tiefen Proben zur Herstellung von Dünnschliffen für mikromorphologische Untersuchungen entnommen. Sieben Jahre später, im Frühjahr 2008, fand eine Wiederholungsbeprobung statt und es wurde jeweils ein Dünnschliff aus der gleichen Tiefenstufe angefertigt. So konnte verglichen werden, wie sich das Bodengefüge im Lauf der Jahre verändert hat. Dabei zeigte sich:

- Der Boden im K-Feld ist weiterhin dicht. Sowohl in 40 cm Tiefe (Bilder 13a und 13b) als auch in 90 cm Tiefe (Bilder 16a und 16b) wurde die einbaubedingte Verdichtung nicht aufgelöst. Die für Transportprozesse in vertikaler Richtung wie Infiltration, kapillarer Aufstieg in Trockenphasen, Durchlüftung und Durchwurzelung extrem hinderliche horizontale Orientierung des Bodengefüges (siehe vor allem Bilder 16a und 16b) besteht fort.

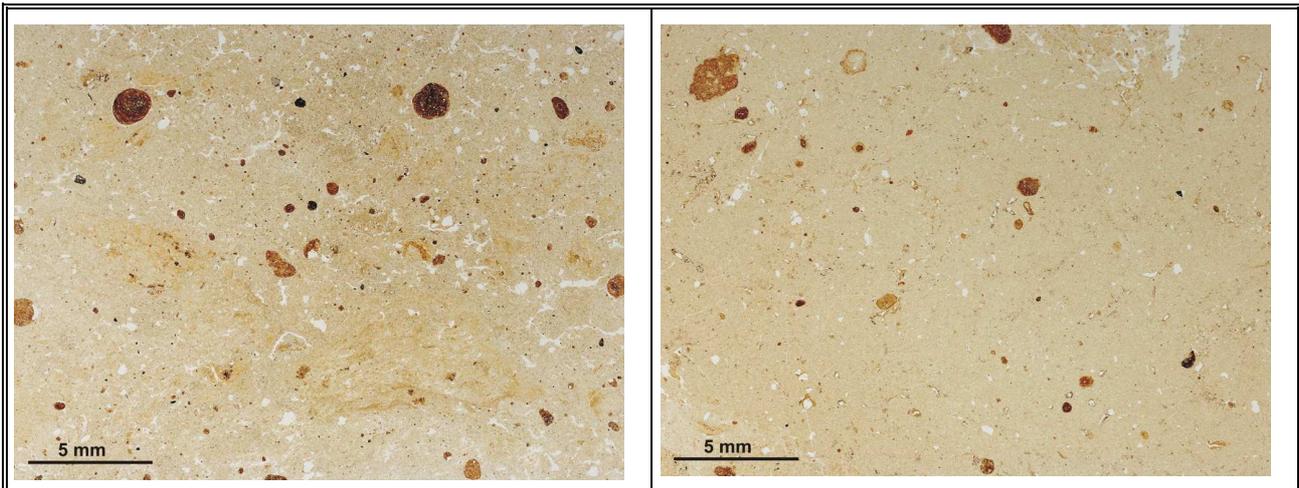


Bild 13a / 13b: **K-Feld** Frühjahr 2001 (links) und 2008 (rechts). Das Gefüge ist jeweils dicht, größere kontinuierliche Hohlräume fehlen. Die rundlichen rotbraunen Objekte sind Eisenkonkretionen. Spuren einer rezenten Besiedlung durch Tiere (Röhren, Losungen) oder Wurzeln (lebende Wurzeln oder Wurzelreste) sind nicht zu finden.

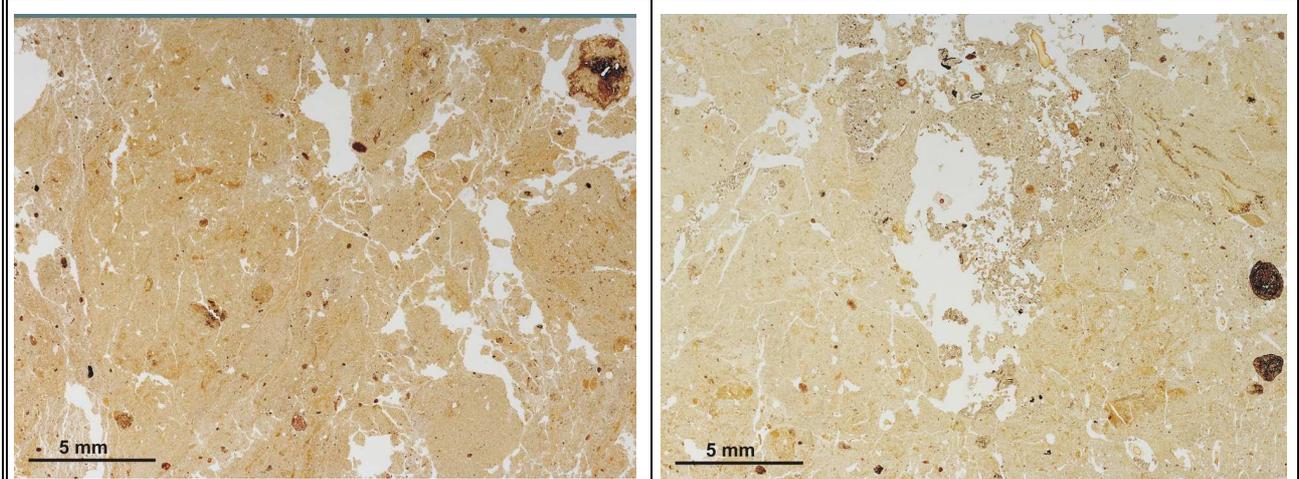


Bild 14a / 14b: **U-Feld** im Frühjahr 2001 (links) und 2008 (rechts). Das Gefüge links ist in Folge des unverdichteten Einbaus hohlraumreich. Die künstlichen Hohlräume waren aber nicht stabil, das Gefüge wurde wieder dichter. In weiten Teilen ist der Unterboden im U-Feld ähnlich wie im K-Feld. Im rechten Bild (Probe von 2008) sind aber zahlreiche Hohlräume zu erkennen. Bei der Probenahme wurde der Rand einer Regenwurmröhre angeschnitten. Dort finden sich neben Regenwurmlosungen auch Spuren anderer Tiere (z.B. Enchyträenlosungen) und Wurzeln (Details siehe unten).

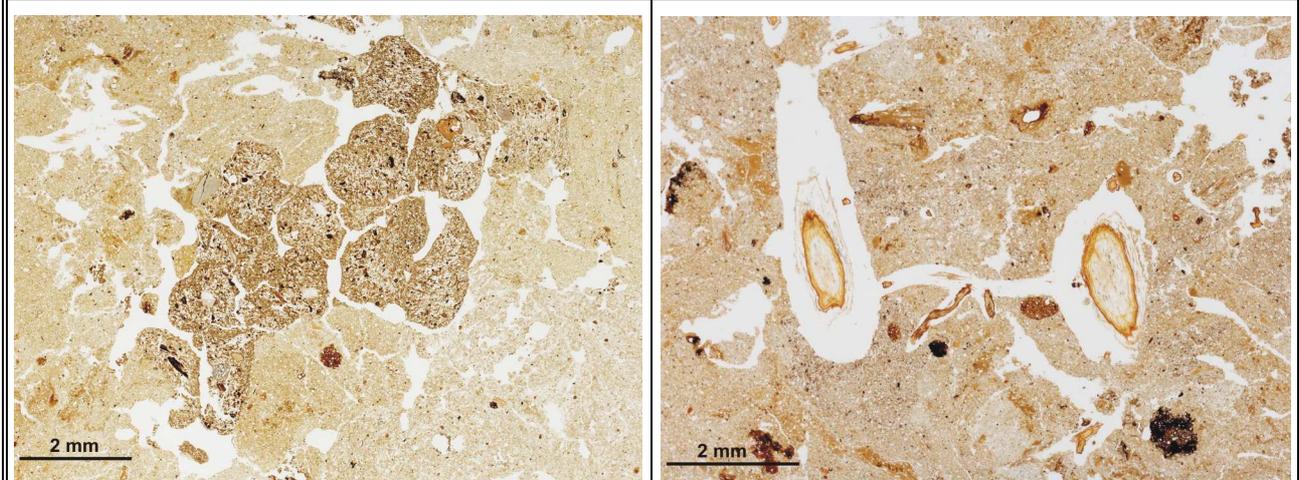


Bild 15a / 15b: Details der Gefügebildung im U-Feld Frühjahr 2008: Im linken Foto sind dunkle (= humusreiche) Regenwurmaggregate zu sehen. Rechts sind zwei größere und mehrere kleinere Wurzeln zu erkennen. Die Wurzeln hinterlassen nach ihrem Absterben vernetzte Hohlräume, die punktuell Durchlüftung und Wasserinfiltration verbessern.

Bilder 13 –15: Dünnschliffe aus circa 40 cm Tiefe (Vertikalschnitte),

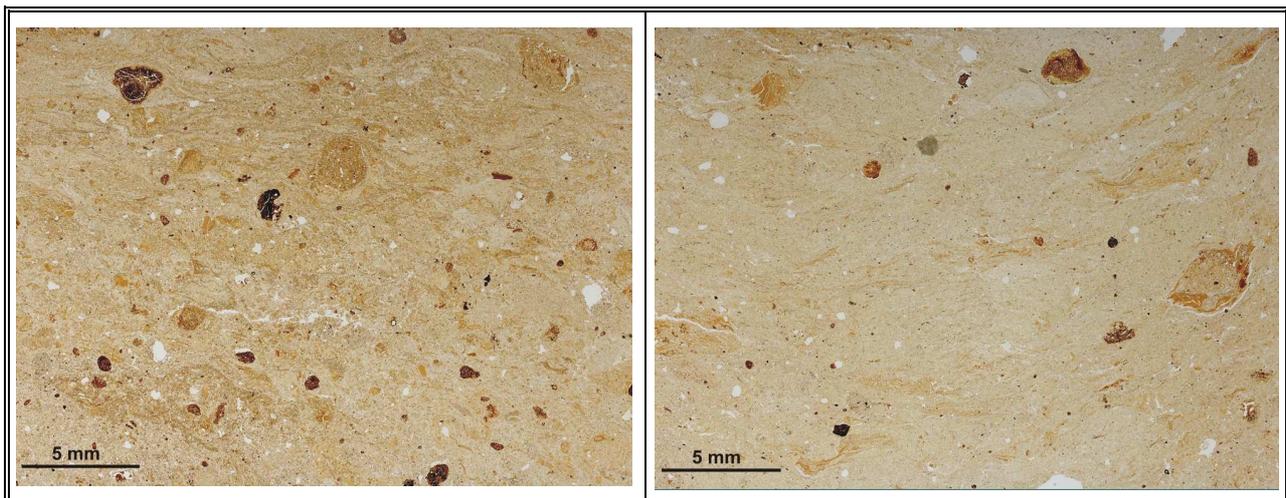


Bild 16a / 16b: **K-Feld** Frühjahr 2001 (links) und 2008 (rechts). Das Gefüge ist jeweils dicht, größere kontinuierliche Hohlräume fehlen. Aufgrund der starken Verdichtung ist der Boden mehr oder weniger horizontal eingeregelt. Die Probe vom Frühjahr 2008 weist keinerlei Spuren von Organismen auf.

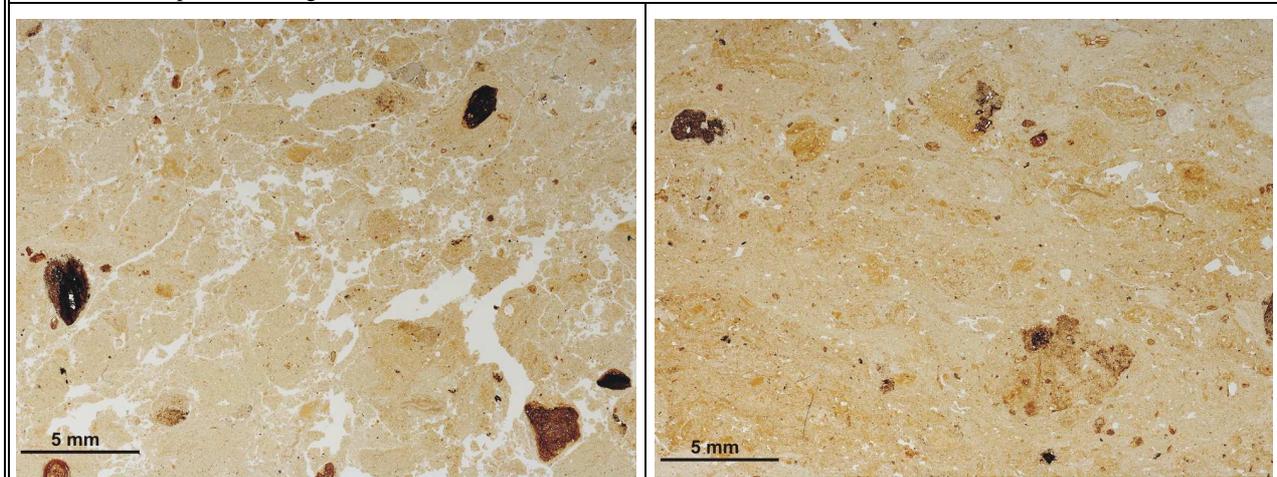


Bild 17a / 17b: **U-Feld** Frühjahr 2001 (links) und 2008 (rechts). Das Gefüge 2001 ist in Folge des unverdichteten Einbaus hohlräumreich. Diese künstlichen Hohlräume waren aber nicht stabil, im Frühjahr 2008 ist der Boden ähnlich dicht wie im K-Feld, allerdings ist im U-Feld der Boden weniger horizontal eingeregelt. Auch im U-Feld sind keine Spuren von Organismen zu finden. Wie im K-Feld zeigen auch die Eisenoxide keinen Bezug zum Hohlräumssystem. Sie liegen noch so da wie abgelagert. Der Boden in dieser Tiefe ist an den meisten Stellen inert.

Bilder 16 –17: Dünnschliffe aus circa 90 cm Tiefe (Vertikalschnitte)

- Der Boden im U-Feld ist 2008 deutlich dichter als unmittelbar nach dem Einbau im Jahr 2001 (siehe Bilder 17a und b). Die zahlreichen künstlichen Hohlräume sind kollabiert. Der Boden im U-Feld ist ähnlich dicht wie im K-Feld, allerdings ist er weniger stark horizontal eingeregelt.
- Die Bodenentwicklung braucht Zeit. Sie erfolgt in den Unterböden aus Lösslehm vor allem durch Organismen und Rissbildung. In 40 cm Tiefe sind neben einer großen Regenwurmröhre (Mitte Bild 14b) krümelige Regenwurmlosungen (Bild 15a) und neue Wurzelröhren (Bild 15b) zu sehen. Am Rand der großen Regenwurmröhre finden sich ebenfalls Losungen von Regenwürmern und punktförmig erscheinende Losungen von Enchyträen (Bild 14b). Kleinere Risse aufgrund von Austrocknung wurden in den Proben von 2008 vor allem in 40 cm Tiefe gefunden (Bild 14b). Allerdings sind diese Schrumpfrisse weniger stabil als Wurzel- oder Regenwurmröhren, denn bei Wiederbefeuchtung schließen sie sich weitgehend.

- Diese Prozesse finden aber nicht flächig, sondern nur punktuell statt. Daher werden vermutlich mittelfristig auch nur Teile des Unterbodens verbessert.

3.1.4. Fazit Bodenstruktur

Die wesentlichen Ergebnisse der Bodenstrukturuntersuchungen sind für den Oberboden:

- Der in geringer Menge im Jahr 2001 ausgebrachte Kompost war spätestens nach sechs Jahren (2007) vollständig von den Regenwürmern mit dem Mineralboden intensiv vermischt worden.
- Nach 10 Jahren hat sich ein 5 – 10 cm mächtiger, krümeliger Oberboden entwickelt. Dies ist vor allem eine Folge der Tätigkeit von Regenwürmern.
- Das Ausbringen von Regenwürmern ist daher bei großflächigen Deponierekultivierungen eine sinnvolle Maßnahme. Ebenso sollte, wo möglich, eine geringe Menge Kompost (Schichtdicke circa 2 cm) zur Förderung der biologischen Aktivität auf die Bodenoberfläche ausgebracht werden. Größere Kompostmengen sind nicht nur überflüssig, sie können zu viel mehr Schaden als Nutzen führen: Insbesondere können beim Einarbeiten von Kompost in den Mineralboden aufgrund der ungünstigen Struktur rekultivierter Böden sehr leicht anoxische Verhältnisse entstehen, die Wurzeln und Bodentiere nachhaltig schädigen.
- Frost hatte nur eine geringe Bedeutung für das Bodengefüge. Typische Frostlamellen wurden nur in einem Dünnschliff in den obersten 2 cm gefunden.
- Trockenrisse hatten in dem untersuchten Proben keine große Bedeutung (allerdings zeigten sich bei Aufgrabungen große tiefreichende Trockenrisse in Abständen von mehreren dm)

Die Bodenentwicklung beschränkte sich bisher vor allem auf den Oberboden. Im Unterboden ist die Entwicklung viel weniger weit fortgeschritten:

- In 40 cm Tiefe wurden 2007 an einzelnen Stellen Spuren einer Gefügeentwicklung um Regenwurmröhren gefunden. In 90 cm Tiefe war nur eine Selbstverdichtung des Bodens im U-Feld durch Auflast zu erkennen.
- Gefügebildung durch Quellen und Schrumpfen hat im Unterboden nur lokal Bedeutung, Frost hat im Unterboden keinerlei Wirkung.
- Es ist anzunehmen, dass tiefgrabende Regenwürmer lokal den Unterboden erschließen⁴. Diese Gefügeverbesserung wird aber nur lokal und allmählich erfolgen.

Auch unter günstigen Bedingungen braucht die Entwicklung eines neuen Bodengefüges im Unterboden sehr viel Zeit. In den Versuchsfeldern sind keine Prozesse erkennbar, welche die Verdichtungen im Unterboden - vor allem im K-Feld - auf ganzer Fläche auflösen könnten. Regenwürmer wirken nur punktuell. Verdichtungen im Unterboden sind daher vermutlich für lange Zeit (Dekaden bis Jahrhunderte) persistent und sollten daher, wo immer möglich, vermieden werden.

⁴ Bei Aufgrabungen in einer Löss-Parabraunerde in Kleinhohenheim reichten die Röhren bis in 130 cm Tiefe.

3.2. Trockenraumdichte des Bodens

Bei jeweils einer Aufgrabung pro Testfeld im Mai 2008 wurden die Trockenraumdichten in den Tiefenstufen 50, 85 und 100 cm gemessen. Einzelne Aufgrabungen vermitteln lediglich punktuelle Informationen über den Bodenzustand, deshalb ist es problematisch, die Ergebnisse auf die ganze Fläche zu übertragen. Eine hinreichende Anzahl von Stichproben zu gewinnen, verbietet sich aber, da der Bodenaufbau der Lysimeterfelder übermäßig gestört würde. Deshalb können die Untersuchungsergebnisse zu den Trockenraumdichten - auch aus den Vorjahren - lediglich Tendenzen aufzeigen. Der Oberboden in 25 cm Tiefe konnte 2008 nicht beprobt werden, da er zu trocken für eine Probenahme war.

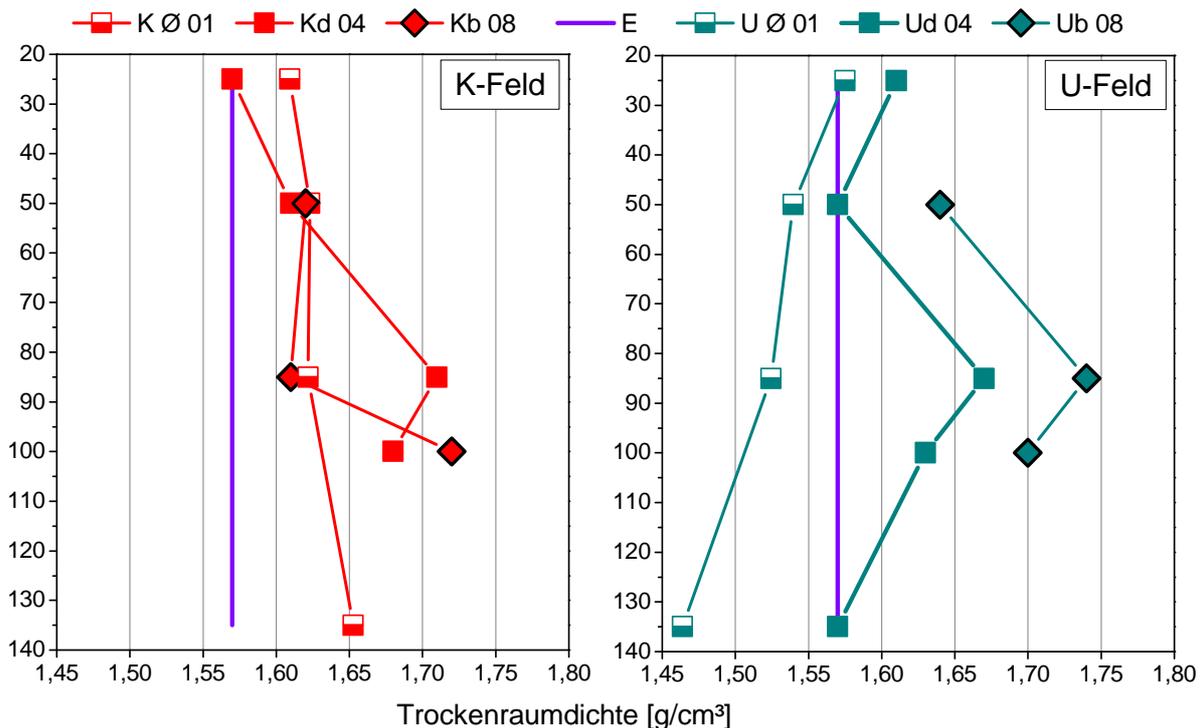


Abbildung 3-4: Trockenraumdichten in den Jahren 2001 (Ø 01 = Mittel von 4 Probestellen), 2004 und 2008; die Kleinbuchstaben geben die Lage im Testfeld an: b = Unterhang, d = Oberhang, E = mittlere Dichte des Bodenmaterials im Einbauzustand

Die 2008 gemessenen Trockenraumdichten sind im Vergleich mit früheren Werten in Abbildung 3-4 aufgetragen. Die Grafik vermittelt den Eindruck, als stiege die Trockenraumdichte im U-Feld stetig an, was sich im Prinzip mit Setzungen des unverdichteten Bodens gut erklären ließe. Allerdings fanden die größten Setzungen innerhalb der ersten beiden Jahre nach dem Bau der Testfelder statt (BIEBERSTEIN et al. 2005). Nach 2003 erreichten sie nur noch marginale Beträge und erklären somit nur den Dichteanstieg von 2001 nach 2004. Auflastbedingte Setzungen und Verdichtungen müssten sich außerdem vor allem im Unterboden auswirken. Dies ist aber nicht der Fall, denn das Dichte-Maximum im U-Feld scheint in der Tiefe von circa 85 cm zu liegen. Außerdem ist der tiefere Unterboden des U-Feldes stets weniger dicht als der des K-Feldes. Es ist deshalb anzunehmen, dass 2008 zufällig eine sehr dichte Stelle des U-Feldes beprobt wurde. Insgesamt liegen alle Trockenraumdichten im U- und K-Feld in der Bewertungsstufe *hoch* (1,6 bis <1,8 g/cm³) nach AG BODEN (2005).

3.3. Regenwurmpopulation

3.3.1. Entwicklung der Population in Leonberg

Die im Bodenmaterial am Entnahmestandort vorhandene Regenwurmpopulation wurde im Winter 2000 durch Bodenumlagerung, Bodeneinbau sowie in Folge von Nahrungsmangel so stark dezimiert, dass der Boden der Leonberger Lysimeterfelder nach der Baumaßnahme praktisch regenwurmfrei war. Daher wurden im Frühjahr 2002 Regenwürmer ausgesetzt. Die Ergebnisse der Regenwurmfänge (Abbildung 3-5) zeigen eine schnelle Zunahme der Regenwurmabundanzen und -biomassen⁵. Das Maximum an Biomasse wurde im Frühjahr 2008, die höchsten Abundanzen im Frühjahr 2009 erreicht. Bis zum Jahr 2010 gab es dann eine mäßige Abnahme der Population. Im Jahr 2011 war der Rückgang der Regenwürmer drastisch; in beiden Lysimeterfeldern wurde nur noch circa ein Fünftel der Menge des Vorjahres gefunden. Als Ursache hierfür kommt eindeutig die Witterung in Frage: Das Frühjahr 2011 war bis Ende Mai extrem trocken. Anschließend fielen zwar relativ ergiebige Sommerniederschläge, aber sie reichten nicht aus, um den Boden zu befeuchten (Abbildung 3-6). Zwar ist ein Rückgang der Bodenwassergehalte in der Vegetationszeit normal, weil die Evapotranspiration die Niederschläge übersteigt, die Austrocknung des Bodens setzt 2011 aber früher als normal ein und war auch deutlich stärker als in den Vorjahren. Für das Ergebnis der Regenwurmfänge gibt es zwei Erklärungsansätze:

- Entweder wurden nicht alle am Standort vorhandenen Regenwürmern erfasst, weil die Bedingungen im Jahr 2011 dazu nie günstig waren. Ein Regenwurmfang sollte nur bei feuchtem Boden und Bodentemperaturen zwischen 6 und 14° C stattfinden, da bei trockenem Boden die Effektivität der Fangmethoden geringer ist. Im Frühjahr und Sommer 2011 war daher kein Fang möglich. Im Herbst wurde die Regenwurmerfassung wegen des trockenen Bodens so lange wie möglich - bis Ende Oktober – hinausgezögert. Länger konnte nicht gewartet werden, denn danach wird es meist zu kalt. Zu diesem Zeitpunkt war der Oberboden zwar feucht, der Unterboden aber immer noch trocken. So ist es möglich, dass sich im Unterboden noch Regenwürmer im Ruhestadium befanden, die nicht erfasst werden konnten.
- Es ist aber auch anzunehmen, dass die oben beschriebene Witterung zu großen Verlusten bei der Regenwurmpopulation geführt hat. Trockene Waldstandorte in Baden-Württemberg weisen eine geringere Regenwurmpopulation als feuchtere auf (EHRMANN et al. 2002) und Langzeituntersuchungen von EHRMANN seit 1989 im Kraichgau (EHRMANN & EMMERLING 2007) zeigen einen deutlich negativen Einfluss von trockenen Jahren auf Regenwurmpopulationen.

Vermutlich treffen beiden Erklärungen teilweise zu, wahrscheinlich hat der zweite Erklärungsansatz eine größere Bedeutung. Klarheit werden erst die Ergebnisse der Erfassung im Frühjahr 2012 bringen. Aufgrund der langsamen Entwicklung von Regenwürmern kann

⁵ Die Regenwürmer wurden mittels einer Kombination aus Elektromethode (auf je 1/8 m², THIELEMANN 1986) und nachfolgender Handauslese einer Teilfläche von 1/30 m² bis zu einer Tiefe von 25 cm gefangen. Wegen der ungünstigeren Fangbedingungen im Herbst 2011 wurde zusätzlich eine Austreibung mit AITC vorgenommen. Dazu wurde die Grube der Handauslese auf 1/8 m² erweitert und mindestens 4 l (= 32 l/m²) AITC Lösung ausgebracht.

anhand des Gewichtes zwischen älteren und erst im Frühjahr 2012 geschlüpften Tieren sicher unterschieden werden.

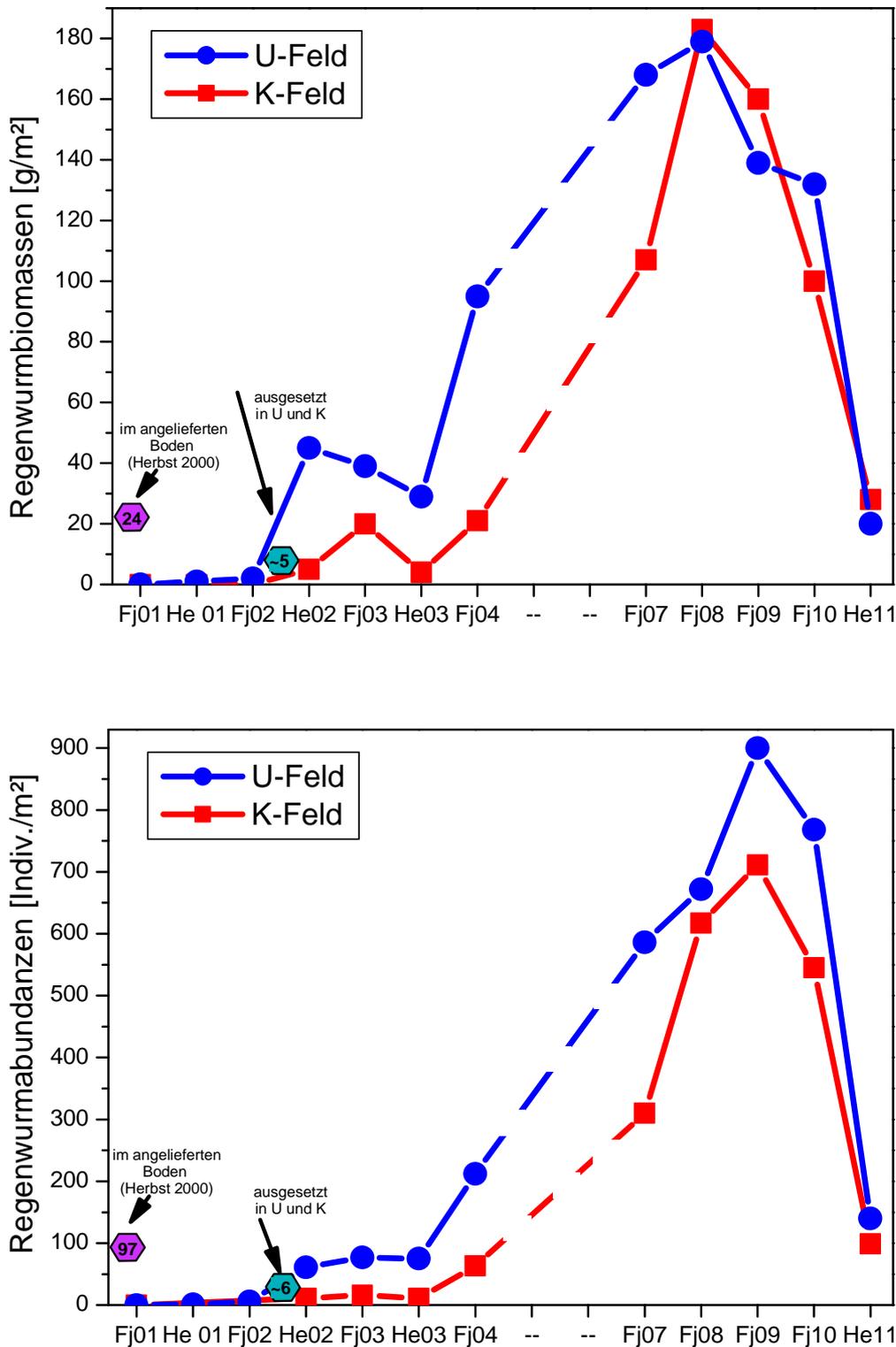


Abbildung 3-5: Entwicklung der Biomassen (oben) und Abundanzen (unten) von Regenwürmern in den Leonberger Lysimeterfeldern von Frühjahr 2001 (Fj01) bis Herbst 2011 (He11). Im Jahr 2011 konnten die Untersuchungen wegen der Frühjahrstrockenheit erst im Herbst durchgeführt werden.

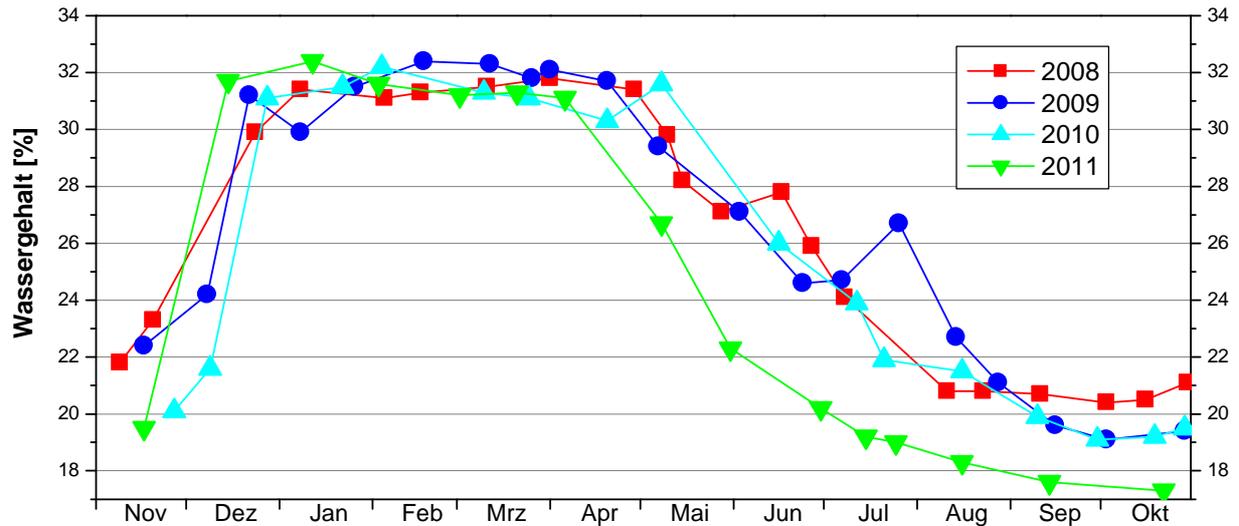


Abbildung 3-6: Verlauf der Wassergehalte des Unterbodens (85 cm Tiefe) des U-Feldes im Jahr 2011 im Vergleich zu den Vorjahren 2008 – 2010.

3.3.2. Vergleich mit anderen Standorten in Baden-Württemberg

Das Arteninventar der Leonberger Versuchsfläche ist mit 8 - 9 Arten auffallend umfangreich. Im Mittel kommen pro Standort in Baden-Württemberg meist nur 4 - 5 Regenwurmarten vor, nur an einem der fast 200 Untersuchungsstandorte konnten mehr Regenwurmartensarten als im Leonberger U-Feld gefunden werden (EHRMANN, unveröff.). Ursache ist vermutlich vor allem das gezielte zusätzliche Einbringen von Regenwürmern in die Testfelder sowie (die eher unwahrscheinliche) Zuwanderung aus Böden unterschiedlicher Herkunft in der Testfeldumgebung. Allerdings weist ein so umfangreiches Arteninventar auch auf gute Habitatbedingungen hin.

Die Abundanzen und Biomassen beider Versuchsflächen lagen von Frühjahr 2008 bis Frühjahr 2010 weit über dem Durchschnitt von Wäldern Baden-Württembergs und erreichten fast (Biomassen) oder überstiegen sogar (Abundanzen) die Werte von guten Grünlandböden (Tabelle 3-1). Beide Versuchsflächen sind derzeit vom Vegetationscharakter her Pionierwälder mit sehr (U-Feld) beziehungsweise relativ (K-Feld) lichter Krautschicht. Die hier gepflanzten Baumarten, vor allem Zitterpappeln (siehe 3.4.2), liefern eine besonders gut abbaubare Streu und fördern so die Regenwürmer. Durch die große Regenwurmpopulation wird auf beiden Flächen im Laufe der Zeit das Bodengefüge verbessert.

Tabelle 3-1: Regenwurmpopulation der Leonberger Lysimeterfelder im Vergleich mit anderen Standorten in Baden-Württemberg

	Standorte	Arten	Abundanzen			Biomassen		
			epig.+ anez.**	endog.	Σ	epig. +anez.	endog.	Σ
Grünland in Baden-Württemberg*								
alle Standorte	42	5,2	95	295	389	67	61	128
nur auf Löss	8	5,8	97	407	507	85	94	180
Wald in Baden-Württemberg*								
alle	82	3,8	59	106	167	23	24	48
nur auf Löss	10	3,9	81	62	142	46	17	63
Versuchsflächen Leonberg (Ø 2008 - 2010)								
K-Feld	1	7,7	61	562	624	71	76	147
U-Feld	1	8,7	56	711	780	57	91	150

* Datengrundlage: Untersuchungen von EHRMANN im Zeitraum von 1989 - 2008 (unveröffentlicht)

** Epigäische und tiefgrabende anezische Regenwürmer nehmen die Nahrung meist an der Bodenoberfläche auf, endogäische Arten fressen vorwiegend im Oberboden.

3.3.3. Vergleich der Regenwurmpopulation von U- und K-Feld

Die Unterschiede zwischen U- und K-Feld sind mittlerweile sehr gering. Auch das K-Feld ist ein günstiger Standort für Regenwürmer. Dies ist verständlich, denn in beiden Feldern wurde hochwertiger Lösslehm eingebaut und beide Flächen wurden nach dem Bodeneinbau 50 cm tief gelockert. Diese Bodenqualität reicht in Normaljahren für eine umfangreiche Regenwurmpopulation aus. In Normaljahren ist das U-Feld der günstigere Standort, es gibt mehr Bauten tiefgrabender Regenwürmer (Abbildung 3-8) und der weniger verdichtete Unterboden ist günstiger, um tiefreichende Röhren anzulegen. Auch war der Rückgang der Regenwurmpopulation im Trockenjahr 2003 im U-Feld viel geringer als im K-Feld. Im trockeneren Oberhang des K-Feldes verschwanden die Regenwürmer 2003 im Gegensatz zum U-Feld vollständig.

Im Trockenjahr 2011 fand in beiden Testfeldern aber ein ähnlich großer Rückgang der Regenwurmpopulation statt. Mittlerweile wirken sich vermutlich auch die Unterschiede im Baumbestand aus. Der üppigere Baumbestand im U-Feld liefert zwar deutlich mehr Streu, was günstiger ist, verbraucht gleichzeitig aber auch mehr Wasser. Dies könnte negative Auswirkungen in Trockenjahren haben.

Besiedeln Regenwürmer rekultivierte Flächen quasi automatisch ?

Nach dem Bodeneinbau dürften die meisten Rekultivierungsflächen vermutlich fast regenwurmfrei sein. Dies zeigte sich auf der Versuchsfläche Leonberg (Abbildung 3-5) und auch bei der vor kurzem rekultivierten Kreismülledeponie Böblingen. Auf dieser circa 20 ha großen

Deponie wurde nach Abschluss der Rekultivierung bei 150 Stichproben kein einziger Regenwurm gefunden (EHRMANN & WATTENDORF 2010).

Regenwürmer kommen - in allerdings sehr unterschiedlichen Dichten - an praktisch allen Waldstandorten in Baden-Württemberg vor (EHRMANN et al. 2002). Deshalb werden im Lauf der Zeit auch alle geeigneten, durch Rekultivierung neu geschaffenen Standorte wieder besiedelt. Die durchschnittliche Ausbreitungsgeschwindigkeit von Regenwurmpopulationen beträgt auch unter günstigen Bedingungen nur 5 - 10 Meter pro Jahr (MARINISSEN & VAN DEN BOSCH 1992), kleine Flächen bis circa einem Hektar können so in absehbarer Zeit in der Regel ohne weiteres Zutun besiedelt werden. Auf größeren Rekultivierungsflächen sollten Regenwürmer eingebracht werden, um die Nährstoffrückführung und Verbesserung des Bodengefüges wesentlich zu beschleunigen.

3.3.4. Regenwurmbauten und Regenwurmröhren

Die wichtigen tiefgrabenden anezischen Regenwürmern hinterlassen charakteristische Spuren an der Bodenoberfläche und relativ dauerhafte Röhren im Boden. Diese können erfasst werden und geben einen semiquantitativen Hinweis auf das Vorkommen von Regenwürmern. Im Frühjahr 2011 wurden die Strehhäufchen an der Bodenoberfläche gezählt⁶, im Herbst 2011 wurden die großen Röhren tiefgrabender Arten (≥ 7 mm \emptyset) an speziell präparierten horizontalen Schnittflächen⁷ erfasst.

3.3.4.1. Strehhäufchen

Im U-Feld wurden fast 15 Strehhäufchen je m² gefunden, im K-Feld nur ungefähr die Hälfte davon (Abbildung 3-7). Im U-Feld hatten die Regenwürmer im Herbst fast die gesamte Streu an der Bodenoberflächen gesammelt, die sie im Laufe des Winters in ihre Röhren ziehen (Bild 18). So verlaufen der Streuabbau und damit das Nährstoffrecycling schneller. Die Werte im U-Feld sind typisch für gute Standorte von tiefgrabenden Regenwürmern.

3.3.4.2. Röhren im Boden

Im U-Feld wurden 13 Röhren pro m² gefunden, im K-Feld weniger als die Hälfte, nämlich 5 (Abbildung 3-8). Die Werte sind im Vergleich zu „alten“ Standorten in Baden-Württemberg niedrig. An vier Waldstandorten, die ein Vorkommen von tiefgrabenden Regenwürmern aufwiesen, wurden im Jahr 2007 im Mittel 54 Röhren pro m² gezählt (EHRMANN & SOMMER, unveröffentlicht).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Standorte vor der Trockenperiode im Frühjahr 2011 zwar mit relativ vielen Regenwürmern besiedelt waren. Die Leistungen der Regenwürmer - Röhren im Boden - müssen sich aber erst über Jahrzehnte akkumulieren, um eine standortstypische Struktur zu erhalten.

⁶ 7 Wiederholungen mit je 0,1 m²

⁷ 4 Wiederholungen mit je 0,1 m²

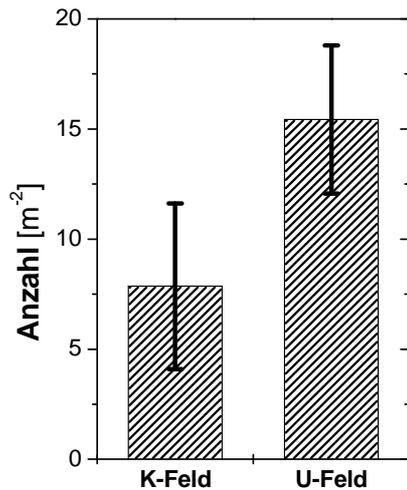


Abbildung 3-7: Anzahl der Streuhäufchen von tiefgrabenden anezischen Regenwürmern in K- und U-Feld im Frühjahr 2011

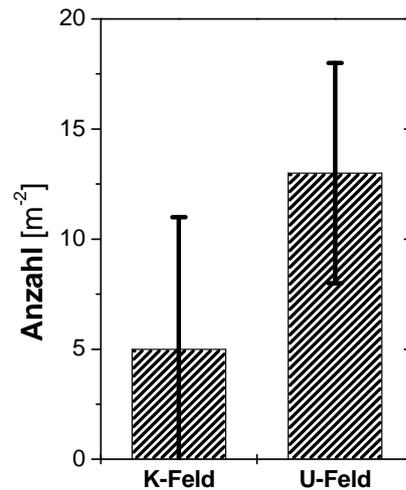


Abbildung 3-8: Anzahl der Röhren von tief grabenden anezischen Regenwürmern in K- und U-Feld im Herbst 2011 in 20 cm Tiefe



Bild 18: Von *Lumbricus terrestris* zusammengezogene Streu im Leonberger U-Feld. Jedes Häufchen ist mit einem x markiert. Die Regenwürmer haben den größten Teil der Streu an der Bodenoberfläche zusammengezogen.

3.4. Vegetation

3.4.1. Durchwurzelung

In den Schürfen wurde im Mai 2008 auch die Durchwurzelungsintensität an der Profilwand ermittelt. In beiden Feldern zeigt sich ein klassischer tiefenabgestufter Verlauf der Durchwurzelung (Abbildung 3-9). Die Bewertung der Intensität gemäß AG BODEN (2005) ergibt in den Oberböden beider Testfelder eine *starke bis sehr starke* Durchwurzelung (Stufen W4 und W5 = 11 - 50 Wurzeln/dm²) bis in 30 cm Tiefe. Im Unterboden ist die Durchwurzelung im U-Feld überwiegend *mittel* (6 - 10 Wurzeln/dm²) bis *schwach* (3 - 5 Wurzeln/dm²), im K-Feld *mittel* bis *sehr schwach* (1 - 2 Wurzeln/dm²) ausgeprägt.

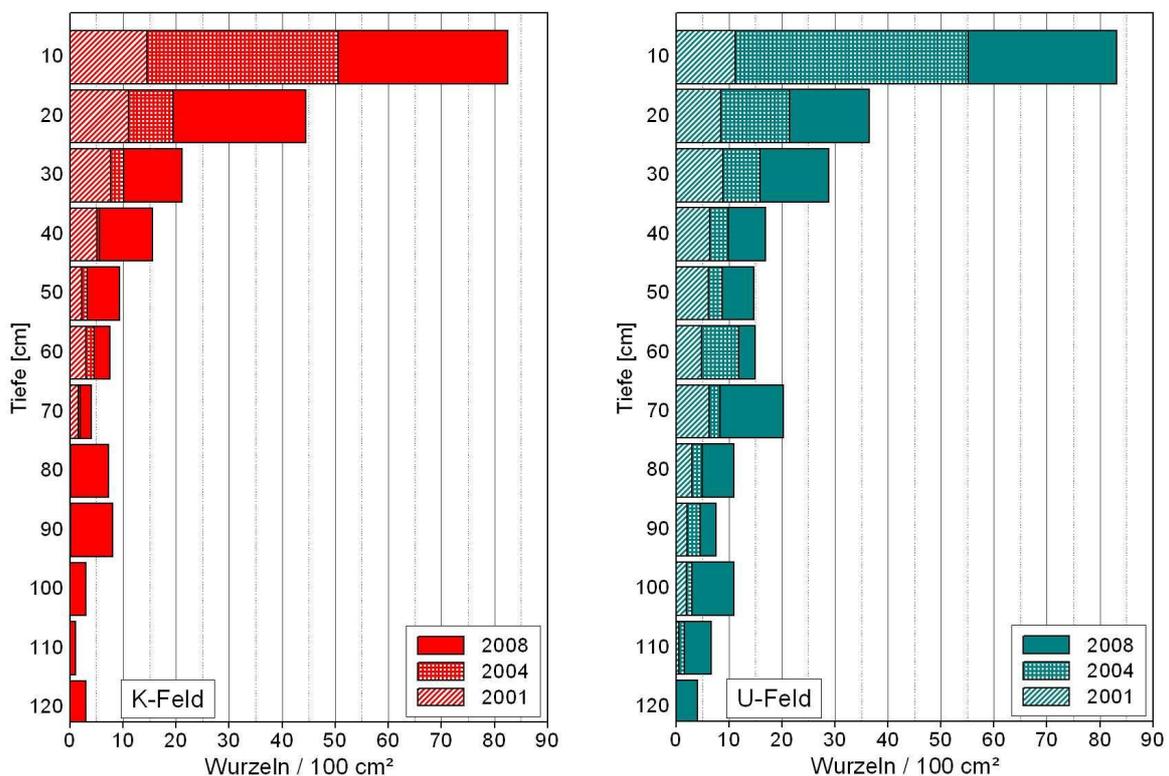


Abbildung 3-9: Durchwurzelungsintensität der Rekultivierungsschicht des K- und des U-Feldes; Ergebnisse von Aufgrabungen im Mai/Juni 2001, Mai 2004 und Mai 2008

Die bisherigen Untersuchungen zur Durchwurzelungstiefe und -intensität (z.B. WATTENDORF et al. 2005) erbrachten deutlichere Unterschiede zwischen den Testfeldern. Während die Wurzelzahlen der Oberböden beider Felder vergleichbar hoch waren, fehlten Wurzeln im Unterboden des K-Feldes in den Jahren 2001 und 2004 weitgehend (Abbildung 3-9). In Tiefen unterhalb 50 cm wurden im U-Feld bei diesen Untersuchungen deutlich mehr Wurzeln gefunden. Diese Tendenzen sind zwar auch jetzt noch zu erkennen, die Aufgrabung im Mai 2008 erbrachte aber erstmals auch im K-Feld Wurzeln unterhalb 70 cm Tiefe. Ein Vergleich mit der Trockenraumdichte (Abbildung 3-4, Kb 08) zeigt, dass der Unterboden der Probe-stelle vergleichsweise weniger dicht ist und vermutlich deshalb bis in 80 - 90 cm Tiefe gut von Wurzeln erschlossen werden konnte. In größerer Tiefe nimmt die Dichte des Bodens im K-Feld zu, hier wurden deshalb wiederum weniger Wurzeln als im U-Feld nachgewiesen. Es ist anhand nur einer Probestelle nicht eindeutig zu beurteilen, ob der Unterboden des K-Feldes

nun überall von Wurzeln erschlossen werden kann, oder ob die 2008 festgestellte Durchwurzelung als Reaktion auf eine Stelle mit besonders günstigen Bodeneigenschaften gesehen werden muss.

3.4.2. Gehölze

Rekultivierungsschichten von Deponien werden heute meist mit Gehölzen bepflanzt, da unter anderem bei Waldbeständen mit dem größten Wasserverbrauch der für Deponiebefpflanzungen in Frage kommenden Vegetationstypen zu rechnen ist (DGGT 2000b). Dies gilt vor allem für wüchsige und gut entwickelte Gehölzbestände. Üblicherweise werden zuerst Vorwald-Baumarten wie Erlen, Pappeln oder Weiden gepflanzt, um den Standort für anspruchsvollere Baumarten zu verbessern.

In die Leonberger Versuchsfelder K und U wurden im Winter 2000/01 je 54 Zitterpappeln (*Populus tremula*) gleicher Herkunft gepflanzt. Im Jahr nach der Pflanzung waren im K-Feld 17 Pappeln und im U-Feld 5 Pappeln abgestorben (WATTENDORF et al. 2005). Weitere Verluste resultieren überwiegend aus späterer Beschädigung der Bäume durch Wildverbiss, Bau- oder Pflegemaßnahmen. Sukzessive wurden weitere Bäume (Schwarzerle, Linde, Wildkirsche und Bergahorn) eingebracht. Heute stehen in jedem Lysimeterfeld noch 18 der anfangs gepflanzten Zitterpappeln, der Bestand ist weitgehend geschlossen (siehe Bild 19). Seit 2002 werden Stammdurchmesser und Stammumfang dieser Bäume meist jährlich gemessen (Abbildung 3-10). Im Sommer 2010 wurde zusätzlich flächendeckend die Vegetationshöhe aufgenommen (siehe 2. und Abbildung 3-11).



Bild 19: Luftaufnahme der Versuchsanlage im Sommer 2009; von links: Feld mit Buschlagen, Lysimeterfeld K (Boden verdichtet), Lysimeterfeld U (Boden unverdichtet)



Bild 20: Gehölzentwicklung auf dem K-Feld (links) und U-Feld (rechts) 2005 - 2008



Bild 21: Gehölzentwicklung auf dem K-Feld (links) und U-Feld (rechts) 2009 - 2011

Die Untersuchungen zeigen, dass sich die Bäume in den beiden Versuchsfeldern unterschiedlich entwickelt haben. Vor allem in den ersten Jahren nach der Pflanzung (z. B. 2005, Bild 20) erschien der Bestand im U-Feld deutlich besser entwickelt, was auch die Messungen des Stammumfangs belegen (s. u.). Inzwischen sind die Bestände visuell ähnlicher geworden (z. B. 2011, Bild 21). In Abbildung 3-10 sind alle Einzelwerte des Stammumfangs jeder Zitterpappel von 2002 bis 2011 und die jeweiligen Mittelwerte der Kollektive K-Feld und U-Feld aufgetragen. Der mittlere Stammumfang der beiden Kollektive unterschied sich bei der ersten Messung zwei Jahre nach der Pflanzung nur wenig. Er betrug im K-Feld 39,2 mm und im U-Feld 45,1 mm. Nach 2004 beginnen die Werte stärker zu streuen und die jährliche Zuwachsleistung der Bäume steigt an, im U-Feld deutlich stärker als im K-Feld (Abbildung 3-10). Die Tendenz der höheren Zuwachsleistung im U-Feld hat sich inzwischen etwas abgeschwächt. Im Winter 2011 betrug der Mittelwert des Stammumfangs⁸ im U-Feld 600,3 mm und im K-Feld 443,1 mm. Auch der Umfang des jeweils stärksten Baumes unterscheidet sich in den Feldern deutlich, er beträgt aktuell im K-Feld 634 mm und im U-Feld 745 mm.

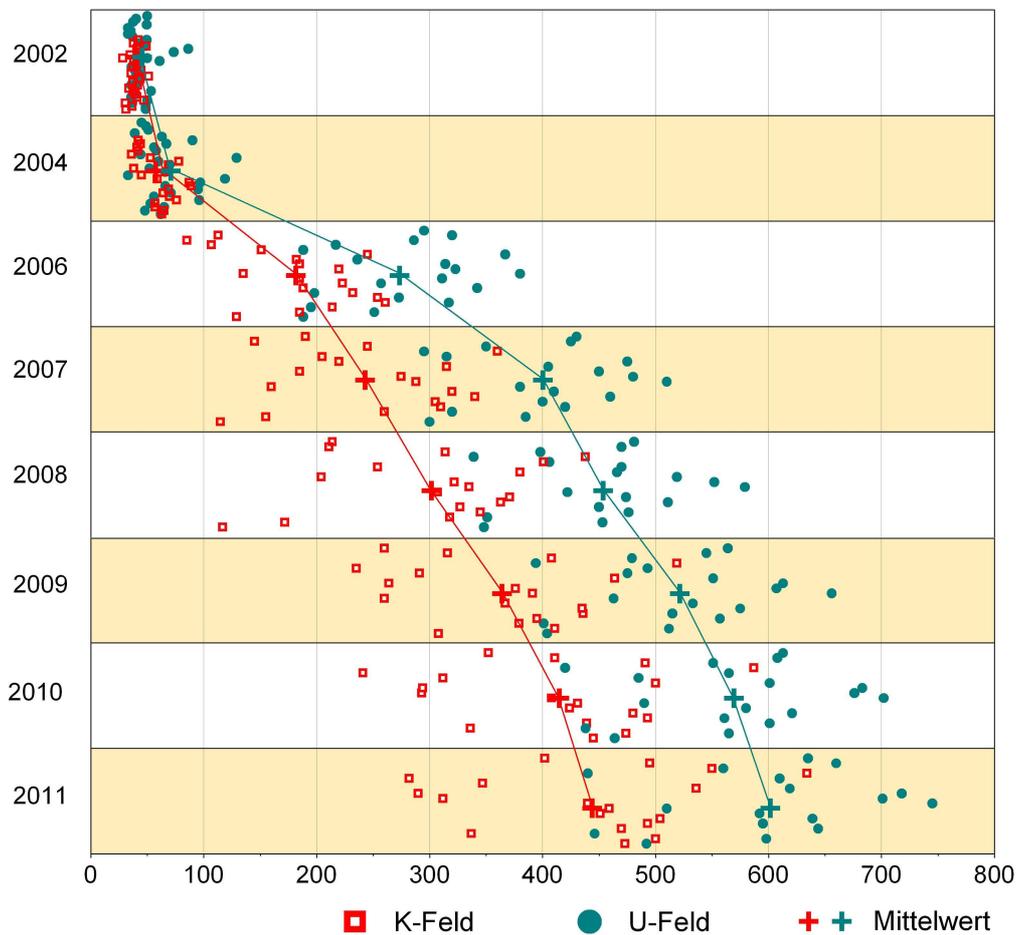


Abbildung 3-10: Stammumfang der Zitterpappeln (*Populus tremula*) auf den Versuchsfeldern von 2002 bis 2011, gemessen in 20 cm Höhe.

⁸ gemessen in 20 cm Höhe über dem Boden

Auch die Höhe des Bewuchses ist in den beiden Lysimeterfeldern unterschiedlich (Abbildung 3-11). Im K-Feld ist ein großer Teil der Fläche von Pflanzen unter 2 m Wuchshöhe bedeckt, also Gräsern, Kräutern und kleinen Sträuchern. Im U-Feld sind diese nicht von großen Gehölzen überschirmten Flächen deutlich kleiner und auf Lücken im Bestand beschränkt. Hier ist die verbreitete Wuchshöhe eher zwischen 4 und 8 m anzusetzen. Dieser Unterschied ist selbst dann offensichtlich, wenn der untere Abschnitt des K-Feldes, in dem die Gehölze überdurchschnittlich geschädigt wurden, unberücksichtigt bleibt. Die mittlere Höhe der Vegetation beträgt im K-Feld 3,65 m und im U-Feld 5,71 m, der jeweils höchste Baum des Feldes ist 12,1 m beziehungsweise 14,2 m hoch. Wuchshöhen bis einschließlich 2 m wurden im K-Feld an 50,3 % und im U-Feld an 20,2 % der Messpunkte registriert.

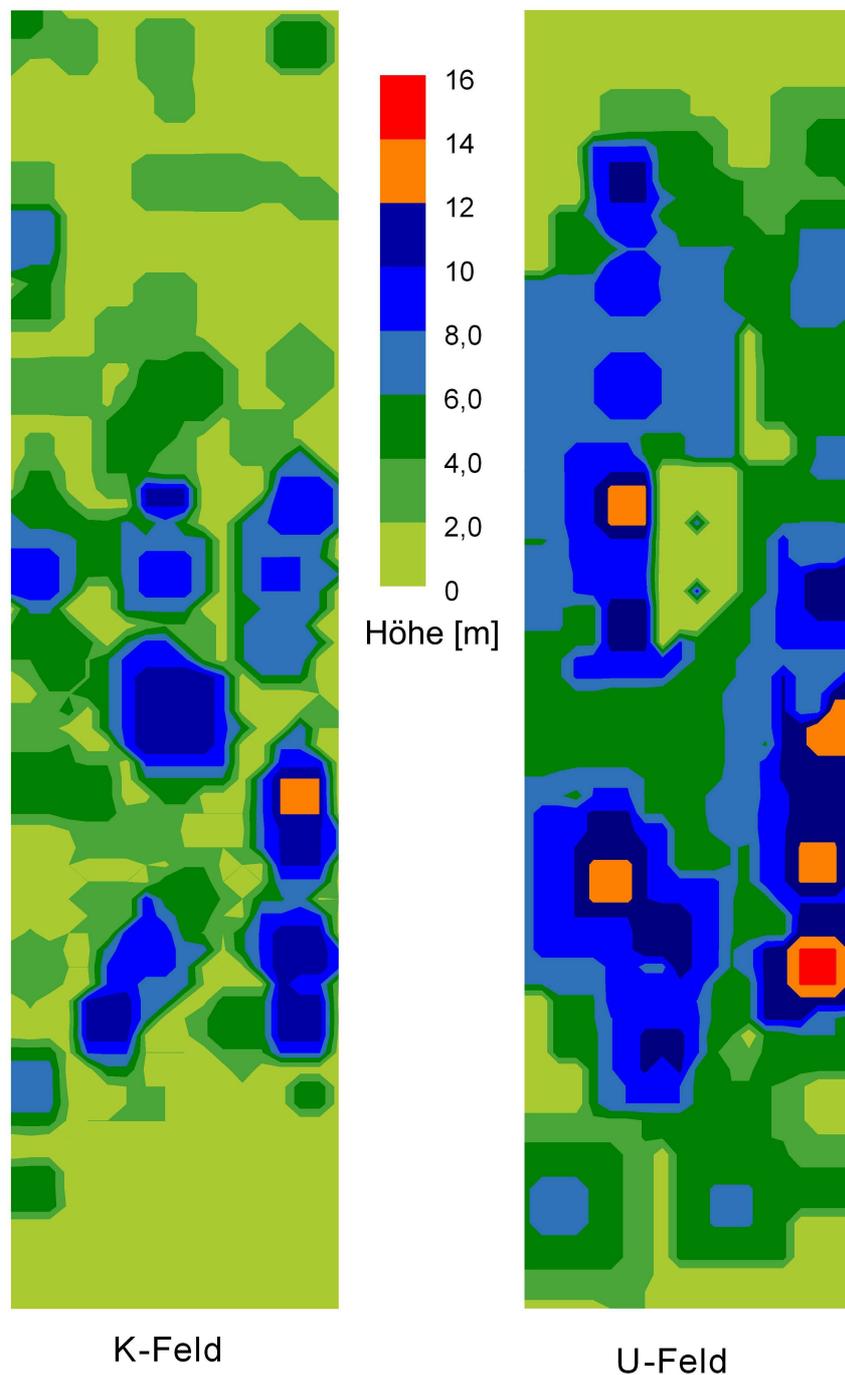


Abbildung 3-11:
Höhenkonturmodelle der
Vegetation der Felder U
und K im Sommer 2010;
weitere Erklärungen siehe
Text

Das bessere Wachstum der Bäume im U-Feld indiziert relativ feine, aber bedeutsame Unterschiede in den Standorteigenschaften der beiden Testfelder, die sich mit üblichen bodenkundlichen Messungen nur unzureichend belegen lassen (WATTENDORF et al. 2009). Sie sind in jedem Fall ein Argument für Boden schonende Verfahren bei der Herstellung von Rekultivierungsschichten, insbesondere den ungeschichteten Einbau mit möglichst geringer Verdichtung. Die Unterschiede zwischen den Beständen im K- und U-Feld wirken sich auch auf den Wasserhaushalt der Lysimeterfelder aus. Der besser entwickelte Gehölzbestand im U-Feld verbraucht mehr Wasser, hierdurch reduziert sich die Absickerung aus der Rekultivierungsschicht (siehe WATTENDORF et al. 2010).

Auf Deponien sollen langfristig gesunde, mehrstufig aufgebaute Waldbestände aus Krautschicht, Strauchschicht und zwei Baumschichten entwickelt werden, die sich selbst verjüngen (SCHABER-SCHOOR 2006). Diese Entwicklung steht in Leonberg noch am Anfang. Zwar haben sich bereits seit 2006 Brombeeren auf nicht von Gehölzen beschatteten Flächen an den oberen Testfeldrändern angesiedelt, auf den Vegetations-Aufnahmeflächen in der Mitte der Lysimeterfelder zeigen sich aber erst seit 2008 zunehmend spontan aufgekommene Baum- und Straucharten (siehe Abbildung 3-12). Es sind dies Hartriegel (*Cornus sanguinea*), Feld- und Bergahorn (*Acer campestre* und *A. pseudoplatanus*) sowie mit bislang nur wenigen Exemplaren Liguster (*Ligustrum vulgare*), Wolliger Schneeball (*Viburnum lantana*), Vogelkirsche (*Prunus avium*) und Eiche (*Quercus robur*). Die meisten dieser Gehölzarten finden sich in benachbarten älteren Pflanzungen beziehungsweise im Wald (Eiche) in der näheren Umgebung. Die Ahorn-Arten können sich mit ihren flugfähigen Samen leicht verbreiten, die Früchte von Hartriegel, Liguster, Vogelkirsche und Eiche werden durch Vögel transportiert.

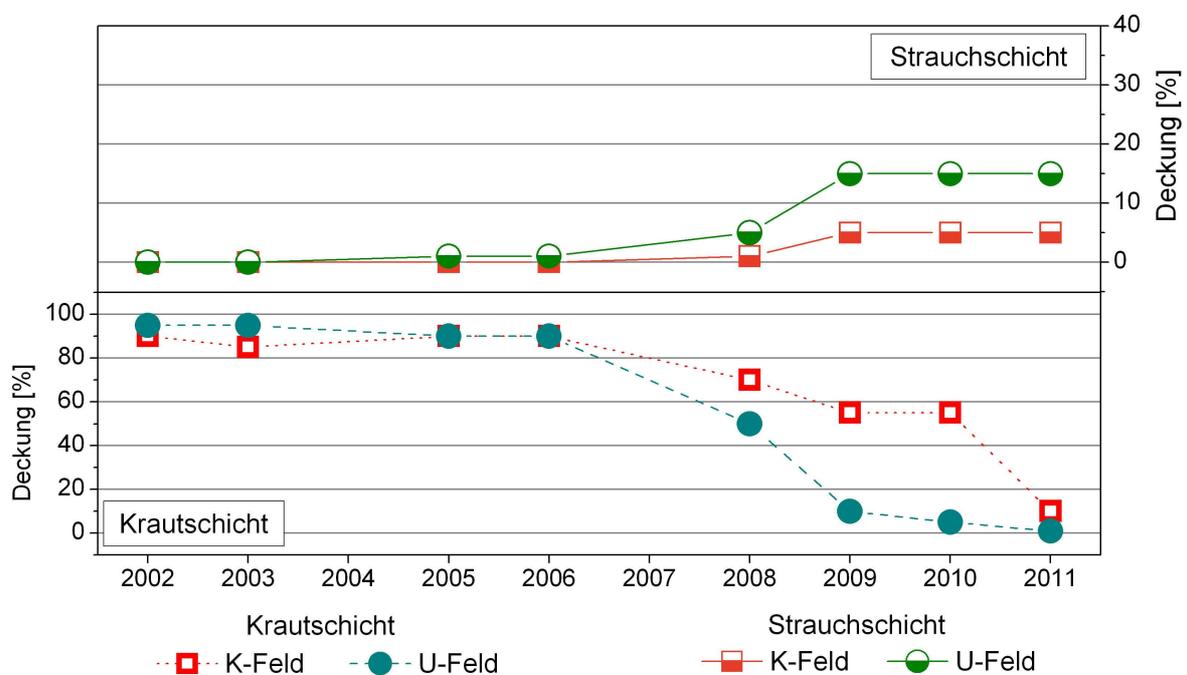


Abbildung 3-12: Deckungsgrade [%] der Kraut- und Strauchschicht in je 40 m² großen Vegetations-Aufnahmeparzellen in den Testfeldern U und K

3.4.3. Krautschicht

In den ersten Jahren nach Anlage der Lysimeterfelder war der Boden zwischen den Gehölzen in der 40 m² großen Vegetations-Aufnahmefläche noch zwischen 85 % und 95 % mit kurzlebigen Pflanzen bedeckt (Abbildung 3-12). Die Vegetation der Krautschicht wird durch die Beschattung der Gehölze unterdrückt und mit zunehmendem Gehölzwachstum (siehe Abbildung 3-10) sanken die Deckungsgrade der Gräser und Kräuter (ohne Gehölzjungwuchs) nach 2006 deutlich ab. Sie betragen im U-Feld im Sommer 2011 nur noch 1 %. Im K-Feld mit seinem weniger dichten Baumbestand (Abbildung 3-12) verlief diese Entwicklung langsamer, 2009 und 2010 deckte die Krautschicht noch 55 % der Aufnahme­fläche. 2011 sank der Deckungsgrad auf 5 %. Möglicherweise werden die geringen Deckungsgrade im Sommer 2011 auch durch die außergewöhnliche Frühjahrstrockenheit mit verursacht.

Die Krautschicht beider Lysimeterfelder ist noch immer geprägt durch Gräser, die in der 2001 ausgebrachten Saatmischung enthalten waren (Knäuelgras, Wiesenrispe, Wiesenlieschgras) sowie wenige eingewanderte Ruderalarten (z. B. Quecke, *Elymus repens*). Es finden sich jedoch mit Knoblauchsrauke (*Alliaria petiolata*) und Nelkenwurz (*Geum urbanum*) schon seit einigen Jahren zumindest zwei Pflanzenarten der lichter­en Wälder, Schläge oder Waldränder mit mäßig beschatteten Standorten. Echte Waldarten wurden bis dato aber noch nicht auf den Flächen gefunden.

3.5. Wasserhaushalt der Lysimeterfelder

Die Absickerung aus den Lysimeterfeldern kann mit der in Leonberg vorhandenen Anlage sehr genau gemessen werden. Oberflächenabfluss tritt nicht auf. Aus der Differenz zwischen Niederschlag und Absickerung ergibt sich nach der Wasserhaushaltsgleichung somit die reale Verdunstung. Modifiziert wird das Ergebnis noch durch die Zwischenspeicherung des Bodens.

In Tabelle 3-2 sind die Jahres- und Halbjahressummen des Niederschlags und der Absickerung im Zeitraum 1.01.2006 bis 31.12.2011 aus den beiden Lysimeterfeldern angegeben. Es zeigt sich, dass -inzwischen bei insgesamt relativ niedrigen Niveau der Sickerwassermengen - deutliche Unterschiede zwischen den Testfeldern bestehen.

Tabelle 3-2: Niederschlag (Wetterstation am Fuß der Testfelder) und Absickerung aus den Lysimeterfeldern von 2006 bis 2011

Jahr	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Niederschlag [mm]						
Ø 740,0	684,8	800,9	731,5	1017,0	768,7	474,1
Σ Mai - Okt	500,6	535,8	431,4	716,0	547,8	351,2
Σ Nov - Apr	184,2	265,1	300,1	301,0	220,9	122,9
Absickerung [mm]						
U-Feld	82,2	80,0	74,6	81,1	63,6	32,5
% von N	12,0	10,0	10,2	8,0	8,3	6,8
Σ Mai - Okt	23,5	24,6	18,7	44,1	20,6	1,8
Σ Nov - Apr	58,7	55,5	55,9	37,0	43,0	30,7
K-Feld	107,5	123,8	124,5	153,7	166,9	67,5
% von N	15,7	15,5	17,0	15,1	21,7	14,2
Σ Mai - Okt	29,9	25,3	20,8	56,1	36,6	6,3
Σ Nov - Apr	77,6	98,4	103,7	97,5	130,3	61,2

Die bis 2011 fortgeschriebenen Summen der Sickerwassermengen aus den Lysimeterfeldern U (Boden unverdichtet) und K (Boden konventionell verdichtet) in Abbildung 3-13 zeigen wie in der Vergangenheit weiterhin einen nahezu synchronen, aber nicht genau parallelen Verlauf der beiden Absickerungskurven, so dass sich ihre Distanz stetig weiter vergrößert hat. Die Niederschlagssumme seit dem Beginn kontinuierlicher Messungen am 1.6.2003 betrug bis zum 31.12.2011 insgesamt 5.983 mm. Aus dem K-Feld versickerten 1.098 mm, also circa 18 % des Niederschlags. Beim U-Feld waren dagegen insgesamt nur 671 mm Sickerwasser zu verzeichnen, circa 11 % der Gesamt-Niederschlagsmenge. Aus dem U-Feld versickerte bislang fast 1/3 weniger Wasser als aus dem K-Feld. Der im Vergleich zur Niederschlagskurve erheblich flachere Anstieg der Sickerwasserlinien in Abbildung 3-13 belegt, dass der Anteil des Sickerwassers am Niederschlag nach wie vor geringer wird und die reale Verdunstung der sich entwickelnden Gehölzbestände demnach ansteigt.

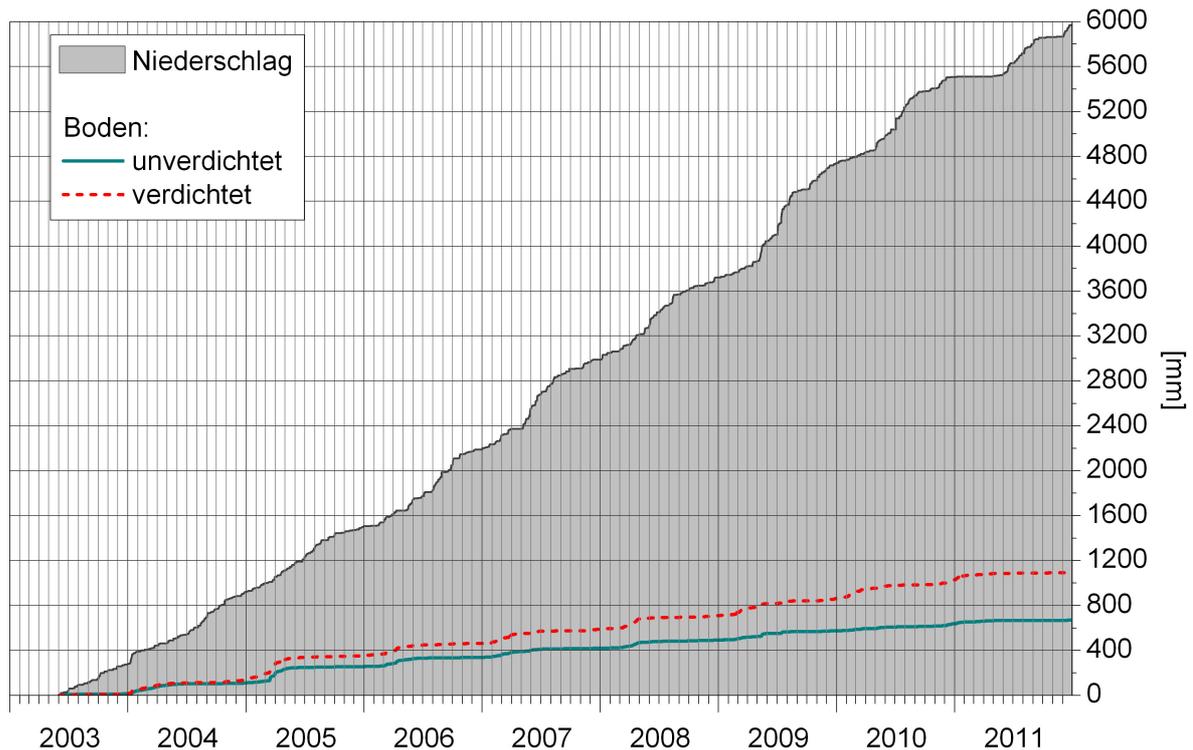


Abbildung 3-13: Niederschlag in Leonberg und Absickerung aus den Lysimeterfeldern U (Boden unverdichtet) und K (Boden verdichtet) von Juni 2003 bis Dezember 2011

Eine genauere Betrachtung der jährlichen Sickerwassermengen aus Lysimeterfeld U seit 1. Januar 2002⁹ (Abbildung 3-14) zeigt anfangs sehr hohe Absickerungsraten. Diese betragen im Jahr 2002 circa 45 % und 2003 immerhin 37 % des Niederschlags. In den Jahren 2007 und 2008 versickerten jeweils circa 10 %, 2009 und 2010 circa 8 % der Jahresniederschlagsmenge. Im sehr niederschlagsarmen Jahr 2011 waren es - bis zum 20.12. - nur noch 6,8 % (siehe auch Tabelle 3-2). Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass die absoluten Sickerwassermengen im Lauf der Zeit deutlich und im Prinzip kontinuierlich zurückgehen. Hierbei spielen jedoch auch die Witterung und die saisonale Niederschlagsverteilung eine wichtige Rolle. So führten hohe Verdunstung und geringer Niederschlag des „Jahrhundertssommers“ 2003 noch im Folgejahr zu reduzierten Sickerwassermengen. Im Winter 2003/04 wurde zuerst der tief entleerte Bodenwasserspeicher aufgefüllt, so dass nur geringe Sickerwassermengen im Januar und Februar 2004 auftraten. Die sehr ungleichmäßige saisonale Verteilung der Sickerwassermengen mit starkem Übergewicht im Winterhalbjahr aufgrund geringer Verdunstung ist auch in dieser Abbildung offensichtlich. Lediglich im Jahr 2009 ist wegen des hohen Anteils der Sommerniederschläge die Absickerung im U-Feld nahezu gleichmäßig verteilt. Im Gegensatz dazu gingen die Sickerwassermengen im Sommerhalbjahr 2011 wegen des niederschlagsarmen Frühjahrs sehr stark zurück, aus dem U-Feld versickerten von Mai bis Oktober 2011 nur noch 1,8 mm.

⁹ Von Feld K liegen erst seit Juni 2003 durchgehende aussagekräftige Messwerte der Sickerwassermengen vor.

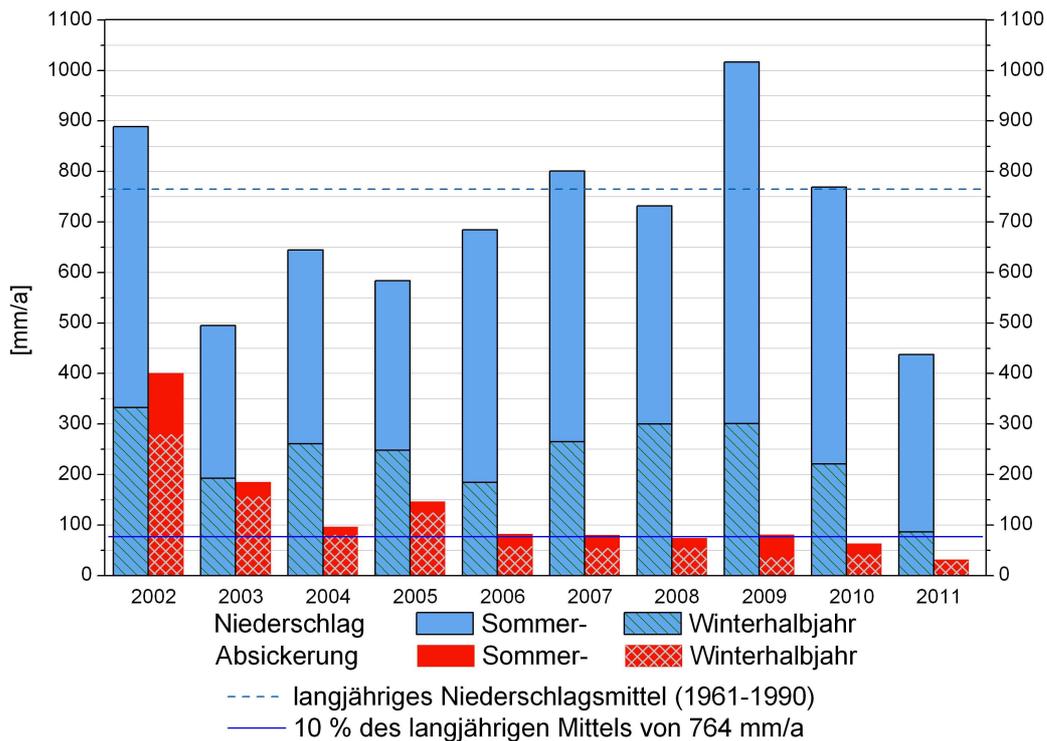


Abbildung 3-14: Niederschlag in Leonberg und Absickerung aus Lysimeterfeld U (Boden unverdichtet), Jahressummen 2002 bis 2011

Unter Berücksichtigung der Ausnahmesituation des Jahres 2003 zeigen sich im U-Feld bisher zwei Entwicklungsphasen: In den Jahren bis 2005 ist die Absickerung mit grundsätzlich abnehmender Tendenz relativ hoch. Ab 2006 beginnt eine Phase mit geringerer Absickerung um oder unter 10 % der Jahresniederschlagsmenge, die durch die ansteigende Verdunstungsleistung der Gehölze bedingt wird. Dieses Ergebnis deckt sich gut mit Beobachtungen auf Testfeldern der Deponie Georgswerder (WATTENDORF & SOKOLLEK 2003) und außerdem auch mit der Gehölzentwicklung in Leonberg (Abbildung 3-10).

Die Funktion des Systems Rekultivierungsschicht und Bewuchs als „natürliche Dichtung“ zur Verringerung der Absickerung ist zwangsläufig vom Witterungsgeschehen abhängig. Die relativ geringe Differenz zwischen den Sickerwassermengen der Jahre 2006 bis 2009 bei allerdings stark unterschiedlichen Niederschlagsmengen zwischen 685 mm (2006) und 1017 mm (2009) legen aber den Schluss nahe, dass die Rekultivierungsschicht Witterungsunterschiede in gewissen Umfang abpuffern kann. Die Sickerwassermengen aus dem U-Feld liegen seit 2008 knapp und seit 2010 deutlich unterhalb der Grenze von 10 % des langjährigen Mittels der Jahresniederschläge. Die von der Deponieverordnung ebenfalls geforderte Grenze von maximal 60 mm/a (siehe 1.1) wird 2010 fast erreicht und im niederschlagsarmen Jahr 2011 sogar deutlich unterschritten (Abbildung 3-14 und Tabelle 3-2).

Es kann angenommen werden, dass die weitere Gehölzentwicklung die Wirkung der Rekultivierungsschicht in Leonberg insgesamt noch steigert. Die bisher erreichte Verbesserung der Verdunstungsleistung des Gehölzbestandes zeigt ein Vergleich der Jahre 2009 (N = 1017 mm) und 2002 (N = 889 mm): 2009 wurde bei überdurchschnittlichen Niederschlägen nur noch 1/5 der Sickerwassermenge von 2002 gebildet (81,1 mm gegenüber 401,0 mm).

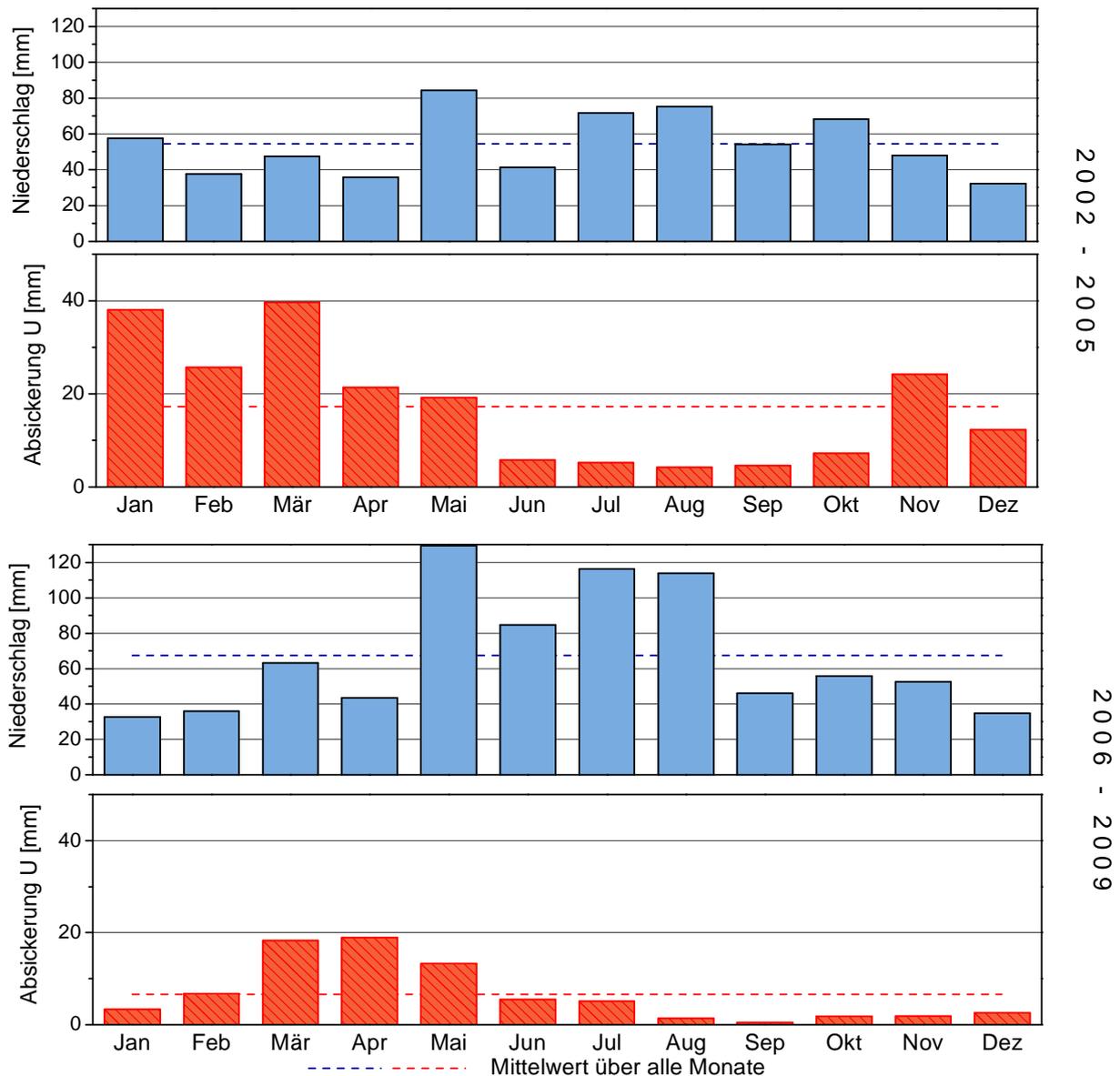


Abbildung 3-15: Mittlere Monatssummen [mm] von Niederschlag und Absickerung aus dem U-Feld in den Jahren 2002 - 2005 (oben) und 2006 - 2009 (unten)

In Abbildung 3-15 wird die saisonale Verteilung von Niederschlag und Absickerung anhand der gemittelten Monatssummen in den Phasen 2002 - 2005 und 2006 - 2009 gezeigt, um den Einfluss der sich entwickelnden Gehölze zu verdeutlichen: Trotz durchgehend höherer Niederschläge von Mai bis August sind die Sickerwassermengen dieser Monate in der Phase von 2006 - 2009 stets niedriger als in der ersten Phase, was nur durch höhere Transpiration der Pflanzen erklärt werden kann. Weiterhin fällt auf, dass im Herbst und Winter (September bis Dezember) bei nur geringfügig kleineren Niederschlagsmengen in der zweiten Phase im Mittel kaum noch Sickerwasser anfällt. Auch dieser Effekt ist mit dem höheren Wasserverbrauch und daraus resultierender stärkerer und tieferer Entwässerung der Rekultivierungsschicht durch die größeren Pflanzen erklärbar. Nach der sommerlichen Austrocknung werden erhebliche Wassermengen benötigt, um den in Leonberg mit circa 700 mm Feldkapazität sehr großen Bodenwasserspeicher wieder soweit aufzusättigen, dass kontinuierlich Wasser versickert. In der zweiten Phase war dies im Mittel erst im Monat März der Fall.

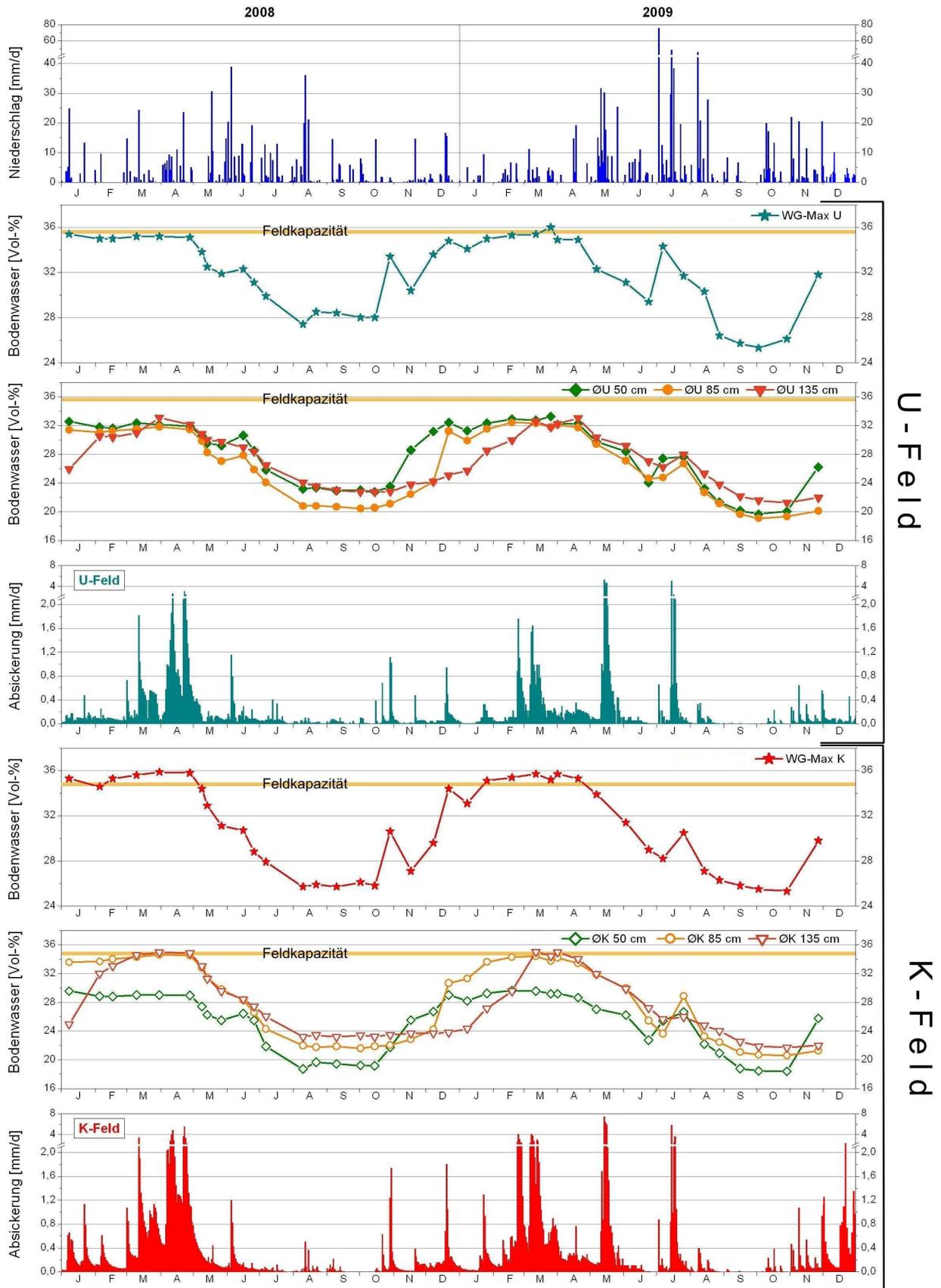


Abbildung 3-16: Niederschlag, mittlere (Ø in 50, 85 und 135 cm Tiefe) und maximale (WG-Max) Bodenwassergehalte und Feldkapazität des Bodens sowie Absickerung, U- und K-Feld, Tageswerte vom 1.1.2008 bis 31.12.2009

Als Beispiel für das Verhalten der Lysimeterfelder in feuchten Jahren kann das Jahr 2009 herangezogen werden. Es war durch außergewöhnlich hohe Niederschlagsmengen gekennzeichnet, von der projekteigenen Wetterstation wurden 1017 mm registriert. Überdurchschnittlich hoch war der Anteil der Sommerniederschläge mit 716 mm. Allein in den Monaten Juli und August fielen 261 mm beziehungsweise 120 mm Regen, davon 75,8 mm bei einem Einzelereignis am 3.7.2009. Das langjährige Mittel in der Umgebung der Testfelder liegt bei 764 mm, mit 434 mm Sommer- und 330 mm Winterniederschlag¹⁰. Die Sickerwassermenge aus dem K-Feld betrug 2009 circa 134 mm, aus dem U-Feld versickerten circa 78 mm.

Eine Betrachtung der Niederschlags- und Sickerwassermengen in täglicher Auflösung zeigt die außergewöhnliche Situation im Sommer 2009 (Abbildung 3-16). Während im durchschnittlich regenreichen Sommer 2008 (431 mm) ab Ende Juni die Absickerungsmengen niedrig bleiben, verursachen im Juli 2009 die hohen Niederschläge Spitzenabsickerungen. Die großen Regenmengen wirken sich auch auf die Bodenfeuchte aus, denn während 2008 der Bodenwassergehalt im Sommer zumindest in größeren Bodentiefen nahezu kontinuierlich absinkt, steigt er im Juli 2009 nochmals deutlich an.

Abbildung 3-16 zeigt weiterhin, dass Bodenwassergehalte und Absickerung nur bedingt miteinander in Beziehung stehen. Vor allem außerhalb der Vegetationszeit, wenn die Pflanzen kaum Wasser transpirieren, erreichen die (mittleren) Bodenwassergehalte die Feldkapazität und es bildet sich verstärkt Sickerwasser. Im Sommer dagegen findet auf Grund von präferentiellem Fluss auch dann Absickerung nach Niederschlagsereignissen statt, wenn die gemittelten Bodenwassergehalte nur wenig ansteigen oder gleich bleiben. Eine bessere Beziehung besteht zwischen maximalem Bodenwassergehalt (in Abbildung 3-16 als maximaler Wassergehalt aller Messpunkte und Tiefenstufen eines Testfeldes am jeweiligen Messtermin dargestellt) und Absickerung.

Die recht prompte - aber in der Höhe sehr stark reduzierte - Reaktion beider Lysimeterfelder auf Niederschlagsereignisse zeigt den Einfluss des schnell dränierenden Sekundärporensystems auf die Absickerung. Dieser Einfluss dürfte auf Grund der Bodenverdichtung im K-Feld größer sein (siehe DGGT 2000a) und kommt neben der geringeren Verdunstung der weniger wüchsigen Gehölze als Mitursache der deutlich höheren Absickerungsraten in Frage. Diese Wirkung zeigt sich auch in den höheren maximalen täglichen Sickerwassermengen des K-Feldes (Abbildung 3-16). Dass es sich bei dem präferentiellen Fluss in Sekundärporen nicht um sogenannte Umläufigkeiten, also Fehlstellen am Rand der Lysimeterfelder handelt, schließt einerseits die besondere Bauweise der Leonberger Testfelder aus (siehe WATTENDORF et al. 2005) und beweisen andererseits die sehr stark gedämpften Reaktionen sowie die vielen Niederschlagsereignisse ohne sofortigen Anstieg der Absickerung.

¹⁰ DWD-Station Renningen-Ihinger Hof (ca. 5,5 km südwestlich der Testfelder) Normalperiode 1961 - 1990

Zusammenfassung/Summary

Forschungsvorhaben BWU 26004 befasst sich mit der Optimierung von Rekultivierungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen. Boden schonender Einbau soll dazu beitragen, die Evapotranspiration zu steigern und die Absickerung zu reduzieren. In vorangegangenen Vorhaben wurden auf der Kreismülldeponie Leonberg (Landkreis Böblingen) zwei Großlysimeterfelder eingerichtet und mit Bäumen bepflanzt. Das erste Lysimeterfeld enthält eine unverdichtet eingebaute Rekultivierungsschicht (Feld U), das zweite eine in Lagen verdichtet eingebaute Variante (Feld K). U- und K-Feld unterscheiden sich nur durch das Einbauverfahren. Bodenmaterial, Bepflanzung und Behandlung der Felder sind identisch. Mit dieser Versuchsanlage wird der Wasserhaushalt unterschiedlich verdichteter Rekultivierungsschichten sowie die ihn beeinflussenden Faktoren untersucht.

Ziel des Projekts war es, die Forschungsarbeit zum Wasserhaushalt und zur Boden- und Vegetationsentwicklung fortzuführen, um lückenlose Datenreihen vom Initialstadium bis zum ausgebildeten Waldbestand zu gewinnen und durch regelmäßige Kontrollen und Wartung den Bestand der Leonberger Lysimeteranlage für den Langzeitbetrieb zu sichern. Das Arbeitsprogramm beinhaltet das Erfassen von Wetterdaten, Absickerungsraten und Bodenwassergehalten in den Lysimeterfeldern sowie Untersuchungen zur Entwicklung der Vegetation, der Regenwurmpopulation und der Bodenstruktur.

Die bodenphysikalischen Eigenschaften der Rekultivierungsschichten wurden nach 2001 und 2004 auch im Jahr 2008 exemplarisch in jeweils einem Profil pro Lysimeterfeld untersucht. Die Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass der unverdichtete Boden acht Jahre nach dem Einbau - vermutlich bedingt durch Setzungen - in Tiefen zwischen 0,5 und 1,3 m ähnlich hohe Trockenraumdichten wie der mechanisch verdichtete Boden aufweist. Außer diesen Setzungen sind in dieser Tiefe nur wenige Anzeichen einer Gefügeentwicklung erkennbar, insbesondere ist im verdichtet eingebauten Boden noch keine Auflösung der Verdichtungen und der horizontalen Orientierung des Gefüges zu erkennen. Erstmals konnten 2008 im beim Einbau verdichteten Boden Wurzeln unterhalb 70 cm Tiefe nachgewiesen werden.

Deutlich günstiger ist die Situation an der Bodenoberfläche. Nach 10 Jahren hat sich ein circa 5-10 cm mächtiger, teilweise krümeliger Oberboden entwickelt. Dies ist vor allem eine Folge der Tätigkeit von Regenwürmern, die den in geringer Menge im Jahr 2001 ausgebrachten Kompost und die seitdem anfallende Streu in den Boden eingemischt haben.

Die im Ausgangsmaterial vorhandene Regenwurmpopulation starb beim Bau der Testfelder im Zuge der Rekultivierung im Winter 2000 fast vollständig aus. Da Regenwürmer auch unter günstigen Bedingungen nur sehr langsam einwandern, wurde die Population durch Einbringen von Regenwürmern im Frühjahr 2002 gefördert. Bis 2008 nahmen Biomassen und bis 2009 auch Abundanzen zu. Im Jahr 2010 war ein moderater Rückgang zu verzeichnen. Die 2010 in den Lysimeterfeldern vorhandene Population war sehr artenreich und entsprach bezüglich Abundanz und Biomasse guten Grünlandböden, was auf sehr gute Habitatbedingungen schließen lässt. Im Jahr 2011 gab es aufgrund der Trockenheit einen drastischen Einbruch der Population in beiden Versuchsfeldern. Die Unterschiede zwischen den Testfeldern U und K sind mittlerweile sehr gering. In Feld U gibt es jedoch mehr Bauten tiefgrabender Regenwürmer, der weniger verdichtete Unterboden bietet ihnen bessere Rückzugsmöglichkeiten.

Die Regenwürmer verbessern sukzessive die Bodenstruktur, es wird aber noch einige Zeit dauern, bis das Bodengefüge von altem Wald oder Grünland erreicht wird.

Die Messungen des Stammumfangs der im Winter 2000 gepflanzten Zitterpappeln (*Populus tremula*) belegen eine unterschiedliche Entwicklung in den Testfeldern. Seit 2004 weisen die Bäume im U-Feld ein stärkeres Dickenwachstum auf. 2010 betrug der Mittelwert des Stammumfangs im U-Feld 568 mm und im K-Feld 412 mm. Auch die mittlere und maximale Höhe des Bewuchses unterscheiden sich. Die mittlere Wuchshöhe beträgt im K-Feld 3,65 m und im U-Feld 5,71 m, der jeweils höchste Baum ist im K-Feldes 12,1 m und im U-Feld 14,2 m hoch. Diese Ergebnisse lassen auf relativ feine, aber für die Standortqualität bedeutsame Bodenunterschiede zwischen den Testfeldern schließen. Bodenschonende Verfahren, insbesondere der ungeschichtete Einbau mit möglichst geringer Verdichtung, sollten deshalb bei der Rekultivierung bevorzugt werden. Entsprechend der unterschiedlich entwickelten Gehölze und der daraus resultierenden unterschiedlich starken Beschattung waren die Deckungsgrade der Krautschicht im U-Feld seit Sommer 2006 niedriger als im K-Feld. Waldarten finden sich noch nicht auf den Flächen.

Die seit Juni 2003 in beiden Lysimeterfeldern gemessenen Sickerwassermengen unterscheiden sich verstärkt seit 2006. Bei insgesamt 5.946 mm Niederschlagsmenge versickerten aus dem K-Feld 1.095 mm (18,4 % des Niederschlags) aus dem U-Feld 670 mm (11,3 %). Dabei gingen die anfangs hohen Absickerungsraten von 45 % (U-Feld; 2002) auf inzwischen unter 8 % (U-Feld; 2009 - 2011) des Jahresniederschlags zurück. Auch Jahresniederschlagssumme und saisonale Verteilung beeinflussen die Sickerwassermenge. Ein Vergleich der Messungen von Absickerung und Bodenwassergehalten in den Lysimeterfeldern zeigt, dass die Wassersättigung des Bodens über Feldkapazität keine notwendige Voraussetzung für die Sickerwasserbildung ist, bereits bei niedrigeren Wassergehalten sind kurzzeitige Abflüsse möglich. Dies zeigt den Einfluss des schnell dränierenden Sekundärporensystems auf die Sickerwasserbildung.

Summary

The research project BWU 26004 deals with characters and water balance of recultivation layers in waste dump surface sealing systems. Optimized recultivation layers with uncompacted soil should minimize the leakage by means of evapotranspiration. In preceding projects on the Leonberg landfill (Landkreis Böblingen) two large lysimeter fields were constructed and planted with trees. The only difference between these two fields is the manner of the installation of the recultivation layers. In field U the soil installed was not compacted, whereas in field K it was mechanically compacted in three single layers. Employing this experimental set-up, the water balances of the two different recultivation layers as well as the most important factors influencing it can be ascertained and compared.

Targets of the project were to continue the examinations on the water regime and the development of soil and vegetation to obtain continuous data series from the outset and to maintain the test field facility for long-term operations. The working program includes the collecting of weather data, leakage rates and soil moisture values including backwater levels in the lysimeter fields as well as examinations of the vegetation development, the earthworm population and the soil structure.

The latest examinations of soil characteristics were conducted in the year 2008, eight years after installation of the recultivation layers, in each a soil profile per lysimeter field. It turns out, that in the zone between 0,5 and 1,3 m the uncompacted soil featured just as high bulk densities as the mechanical compacted soil. This effect may probably be caused by soil subsidence. Except this subsidence only marginal signs of further development of soil structures are recognizably in this depth, in particular no dissolution of compactions and horizontal orientated structures in the testfield with mechanically compacted soil was detected. For the first time in 2008 roots could be discovered in the Field with compacted soil below a depth of 70 cm.

The situation at the soil surface is considerably more favorable. After 10 years a topsoil layer of approximat 5-10 cm has developped, what is first of all a result of the earthworms' activities: The small quantity of compost which was dispensed in the year 2001 and the litter stemming from the trees were mixed with the mineral soil material.

The earthworm population originally existing in the soil material nearly completely died off with the construction of the test fields in the year 2000. Because the resettlement of large areas by earthworms is very slow, earthworms were brought in to foster the populations rehabilitation in spring 2002. Up to 2008 biomasses and until 2009 also abundances of earthworms increased. In 2010 a moderate decline took place. The earthworm population found in 2010 was very rich in species and correspond to good grassland soils, which suggests very good site conditions in the test fields. In 2011 the population of both test fields drastically decreased because of draught. By now, the differences between Field U and K are very small. In field U however more middens of anecic earthworms are found. The uncompacted subsoil is a better shelter for these animals. The earthworms successively amend the soil structure, but it will still last some time, until the structure of long standing forests or graslands will be achieved.

The measurements of the stem girth of the *Populus tremula* trees evidence a different thriftiness in the two test fields. Since 2004 the trees in the U-field show higher growth rates. In 2010 the average stem girth in the U-field is 568 mm and in the K-field 412 mm. Also the average height and the maximum height of the vegetation are different. The average growth height of vegetation in the K-field is 3.65 m and in the U-field 5.71 m. The highest trees height amounts in the K-field to 12.1 m and in the U-field to 14.2 m. These results indicate differences in soil characteristics between the test fields, which are relatively fine, but nonetheless important for site conditions. Soil protecting procedures, in particular the installation of recultivation layers with merest compaction possible, should be favoured therefore. The different development of trees leads to different light conditions for herbs in the test fields. Since summer 2006 the coverage of the herb layer in field U is lower than in field K. Forest plant species are not yet found in the herb layer of the test fields.

Comparing the two lysimeter fields' leakage rates shows increasing differences since 2006. The leakage from the field K with compacted soil averages up to 18.4 % of the annual precipitation and the leakage from the field U with uncompacted soil however amounts to circa 11.3%. The high seepage rates of the outset, for example 45 % in 2002 has by now declined to under 8 % in 2009, 2010 and 2011 (values of field U). As a reason for this the increasing evaporation due to the growth of woody species can be assumed. Moreover, the leakage rates are affected by the weather, in particular the amount and the seasonal distribution of precipitation.

An analogy of seepage rates and soil water content indicates that the generation of leakage does not depend on complete soil water saturation. Already at water contents below field capacity brief discharge events occur. This shows the influence of the fast draining secondary pore system on the generation of leakage.

4. Literatur

AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, Stuttgart, 438 S.

BIEBERSTEIN, A., J. BRAUNS & H. REITH (2005): Standsicherheit und Setzungsverhalten der Rekultivierungsschicht, in: WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN [Hrsg.]: Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren, Herstellung – Eigenschaften – Bodenentwicklung – Funktion, Culterra Band 41: 42 - 57, Freiburg

BRAUNS, J., KAST, K., SCHNEIDER, H., KONOLD, W., WATTENDORF, P. & B. LEISNER (1997): Forstwirtschaftliche Rekultivierung von Deponien mit TA Siedlungsabfallkonformer Oberflächenabdichtung, Handbuch Abfall Band 13, 97 S. + Anhang, Karlsruhe

DepV = Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts, BGBl 2009 Teil I Nr. 22, vom 29.4.2009, S. 900 - 950

DGGT = DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK (2000a): GDA-Empfehlung E 2-31 Rekultivierungsschichten (Entwurf), Bautechnik 77 (9): 617 – 626

DGGT = Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (2000b): GDA-Empfehlung E 2-32 Gestaltung des Bewuchses auf Abfalldeponien (Entwurf), Bautechnik 77 (9): 627 – 629

EHRMANN, O. (2005): Bodenleben: Regenwürmer und Mikroorganismen, in: WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN [Hrsg.]: Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren, Herstellung – Eigenschaften – Bodenentwicklung – Funktion, Culterra Band 41: 108 - 134, Freiburg

EHRMANN, O. & C. EMMERLING (2007): Mögliche Auswirkungen des prognostizierten Klimawandels auf Regenwürmer. Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch. 110/1, 285-286.

EHRMANN, O., M. SOMMER. & T. VOLLMER (2002): Regenwürmer in Wäldern Baden-Württembergs: In: SOMMER, M., EHRMANN, O., FRIEDEL, J.K., MARTIN, K., VOLLMER, T. & G. TURIAN: Böden als Lebensraum für Organismen – Regenwürmer, Gehäuselandschnecken und Bodenmikroorganismen in Wäldern Baden-Württembergs. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 63, Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Universität Hohenheim, Stuttgart, 163 S.

EHRMANN, O. & P. WATTENDORF (2010): Rekultivierung der Kreismülldeponie Böblingen, Standortgutachten und Pflanzempfehlung – Schlussbericht –, unveröff. Gutachten Büro für Bodenmikromorphologie und Bodenbiologie Dr. Otto Ehrmann im Auftrag der Abfallwirtschaft Landkreis Böblingen, 27 S. + Anhang

MARINISSEN, J.C.Y. & F. VAN DEN BOSCH (1992): Colonization of new habitats by earthworms, *Oecologia* 91: 371 - 376

- SCHABER-SCHOOR, G. (2006): Regulierung des Wasserhaushalts von Deponien durch Gehölz-
bewuchs, AFZ-Der Wald 19/2006: 1050 - 1056
- SOHRT, J. (2010): Modellierung des Wasserhaushaltes von Rekultivierungsschichten mit
BROOK90, unveröff. Bachelorarbeit am Institut für Landespflege, Universität Frei-
burg, 69 S. + Anhang
- TA SIEDLUNGSABFALL (1993): Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz,
Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von
Siedlungsabfällen, Bundesanzeiger Jahrg. 45, Nr. 99a, Hrsg. v. Bundesministerium der
Justiz
- WATTENDORF, P. (2005): Konzeption einer Wasserhaushaltsschicht für die Deponie Neuen-
burg (BA I), in: Institut für Landespflege [Hrsg.]: Tagungsband der Fachtagung
„Qualifizierte Rekultivierungsschichten“: 130 – 145, Freiburg
- WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN [Hrsg.] (2005): Rekultivierungsschichten und
Wurzelsperren, Herstellung – Eigenschaften – Bodenentwicklung – Funktion, Culterra
Band 41, 269 S., Freiburg
- WATTENDORF, P. & V. SOKOLLEK (2003): Gestaltung und Entwicklung des Bewuchses auf
Rekultivierungsschichten von Deponien und Altlasten, Schriftenreihe Geotechnik,
Heft 10/1: 171 –183, Weimar